

FEM-Simulation zur Auslegung von keramischen Fräswerkzeugen

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des Grades eines
Diplom-Ingenieurs für Maschinenbau Dipl.-Ing. (FH)

angefertigt am

Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
(IPK) in Berlin

vorgelegt von

STEPHAN HAß

Berlin, im August 2010

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn

Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences

Fakultät Maschinenbau, Fachgruppe Konstruktion

Manuel Wacinski, Dipl.-Ing.(FH)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer IPK, Berlin

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	1
1 EINLEITUNG	2
1.1 Stand der Technik.....	2
1.2 Erläuterung des Einsatzgebietes des Fräasers/ Materialeigenschaften von SiAlON	3
1.3 Einordnung der Arbeit in das Forschungsprojekt <i>TechVolk</i>	4
1.4 Aufgabenstellung	4
1.5 Lösungsansatz.....	4
2 VARIANTENTABELLE	5
2.1 Fräsergeometrieparameter	5
2.2 Eingriffsparameter.....	6
3 ERSTELLUNG DES CAD-MODELLES	8
4 ERMITTLUNG DER KRÄFTE AUS DEM VERSUCH	12
4.1 Zweck und Bedeutung des Versuches	12
4.2 Versuchseinrichtung (Versuchsstand und eingesetzte Geräte)	12
4.3 Versuchsvorbereitung und Durchführung	13
4.4 Versuchsergebnisse.....	14
5 FEM-MODELLIERUNG	16
5.1 Import und Vorbereitung des Ansys Workbench Projektes	16
5.2 Einspannung.....	18
5.3 Vernetzung	19
5.4 Aufbringen der Kräfte auf die Schneide	22
6 DISKUSSION DER ART DER LAST.....	37
7 MODALANALYSE	39
7.1 Voreinstellungen	39
7.2 Die Eigenformen	41
7.3 Rechnerische Ermittlung der Eigenfrequenzen	45
7.4 Diskussion der Ergebnisse	48
8 SPANNUNGSVERGLEICH DER FRÄSERGEOMETRIEN	50
8.1 Vergleich der Sechsschneider	50
8.2 Vergleich des Sechschneiders (1) mit dem Achtschneider (3)	57
8.3 Vergleich des Fräasers (2) mit Fräser (3)	62
9 DISKUSSION GEGENLAUFFRÄSEN/GLEICHLAUFFRÄSEN	65
10 ABLEITUNG VON GESTALTUNGSEMPFEHLUNGEN.....	70
11 ABLEITUNG VON EMPFEHLUNGEN FÜR DEN DETAILLIERUNGSGRAD DER SIMULATION.....	71

11.1 CAD-Modell und Importieren	71
11.2 Vernetzung	72
11.3 Kraftaufbringung	72
12 AUSBLICK	73
12.1 Schneidenbereich	73
12.2 Nutgrund.....	73
12.3 Allgemeines	74
LITERATURVERZEICHNIS.....	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	V
ANHANG.....	VI
DANKSAGUNG	VII
SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....	VIII

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine FEM–Spannungssimulation für einen vollkeramischen Fräser durchgeführt. Dies ist nötig, um sich einen Überblick über die beim Fräsen auftretenden Spannungen zu verschaffen. Mithilfe der Modellierungssoftware SolidWorks2007 wurden dabei verschiedene Geometrien, welche im realen Prozess Anwendung finden, erzeugt, um diese CAD-Modelle in einer Finite-Elemente-Software zu analysieren. Mit Ansys Workbench 12.1 wurde diesem Problem nachgegangen.

Nach dem Importieren der Geometrie wurde eine transiente Strukturanalyse durchgeführt, wo dem Fräser durch eine zeitlich veränderte (auch örtlich) Last auf den Schneiden der Zerspanprozess simuliert wurde. Die Lasten wurden in vorherigen Versuchen im Versuchsfeld des Fraunhofer IPK ermittelt. Nach dem Ende der Simulation stehen Abbildungen und ermittelte Werte der Verformung, Zug-, Druck- und Schubspannungen zur Auswertung bereit. Diese wurden miteinander verglichen. Auch das Gleich- und Gegenlaufräsen wurde untersucht, allerdings brachte das keine nennenswerten Unterschiede, da die Art der Simulation dafür ungeeignet erscheint. Anschließend wurde eine Modalanalyse durchgeführt, um einen Blick auf existierende Eigenfrequenzen und Eigenformen zu werfen.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Fräsergeometrien stellte sich heraus, dass ein Drallwinkel von 48° im Hinblick auf auftretende Zug- und Druckspannungen geringere Ergebnisse lieferte, als die Geometrie mit 58° (beide sechs Zähne/ Schneiden). Gleiche Drallwinkel bei unterschiedlicher Zähnezahlszahl hingegen ergab einen Vorteil für den Sechsschneider. Die wichtigste Erkenntnis erbrachte allerdings die Untersuchung der gleichen Gleichförmigkeitsgrade bei unterschiedlicher Zähnezahlszahl sowie unterschiedlichem Drallwinkel. Dabei ergaben die Versuche mit Ansys nahezu gleiche Zug- und Druckspannungsergebnisse. Nur die Verformung änderte sich proportional mit der Erhöhung der Zähnezahlszahl. Im Beispiel eine Erhöhung von 1/3 auf 8 Schneiden ergab eine Verformungserhöhung um 1/3.

Um die Simulationsergebnisse noch zu verbessern, sollte statt der bisherigen halben Umdrehung in zukünftigen Arbeiten die Last für eine komplette Umdrehung aufgebracht werden. Dann würden die komplexen Spannungszustände bei erstmaligem Lasteintritt weniger ins Gewicht fallen. Positiv zu vermerken ist, dass die Simulation Bereiche zeigt, in denen erhöhte Spannungen auftreten, welche mit den Erwartungen und Erfahrungen aus vorherigen Zerspanversuchen übereinstimmen (Versagensstelle).

1 EINLEITUNG

Diese Diplomarbeit wird sich auf den folgenden Seiten mit der FEM-Spannungssimulation von keramischen Fräswerkzeugen beschäftigen. Doch vorher soll eine kurze Einleitung einen Überblick geben.

1.1 STAND DER TECHNIK

Das Fräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren, das mit meist mehrzahnigen Werkzeugen bei kreisförmiger Schnittbewegung und senkrecht oder auch schräg zur Drehachse gerichteter Vorschubbewegung nahezu beliebig geformte Werkstückflächen erzeugen kann [F1]. Durch die DIN 8589-3 werden sämtliche Fräsverfahren nach ihrer erzeugten Oberflächengüte unterteilt. Wenn die Oberflächengüte durch die Schneiden am Umfang erzeugt wird, spricht man vom Umfangsfräsen, folglich bei erzeugter Oberfläche durch die Stirnseite (oder Nebenseite) vom Stirnfräsen. Der in dieser Arbeit betrachtete Fall beschäftigt sich vor allem mit dem Umfangsfräsen, obwohl auch die Stirn minimal im Eingriff steht. Da das Zerspanvolumen hauptsächlich durch die Umfangsschneiden erzeugt wird, wird im Folgenden nur noch vom Umfangsfräsen gesprochen. Informativ werden noch die geometrischen Formen der Werkstückkontur erläutert. Beim Planfräsen kommt es zur Bearbeitung einer plan verlaufenden Oberfläche mit dem Fräswerkzeug. Dies kann entweder durch Stirn-Planfräsen oder Umfangs-Planfräsen geschehen. Rundfräsen wird vor allem für die Bearbeitung von zylindrischen Flächen verwendet, an denen die Rundungen nicht durch Drehen herstellbar sind. Mit diesem Verfahren können sowohl Innen- als auch Außenkonturen erzeugt werden. Beim Schraub- und Walzfräsen ermöglicht die Herstellung von Lang- und Kurzgewinden. Diese Art der Gewindeherstellung wird aufgrund von hohen Herstellungskosten und hohem Aufwand nur noch selten verwendet. Schließlich noch das Wälzfräsen. Bei diesem Verfahren verlaufen die Zähne des Wälzfräasers wie die Gewindegänge des Grundkörpers, zum Beispiel des eines Zahnrades. Die Zähne sind durch Spanlücken unterbrochen und zusätzlich hinterdreht. Das Werkzeug und Werkstück müssen sich genau definiert zueinander bewegen [M1]. Da es hier um die Betrachtung des vollkeramischen Schneidwerkzeuges geht, noch ein paar Information bezüglich der verwendeten Materialien, die für Werkzeuge beim Fräsen zum Einsatz kommen, auflisten. Für die Bearbeitung von Stahl werden Schnellarbeitsstahl und zähe Hartmetalle der Zerspananwendungsgruppen P15 bis P40, für die Bearbeitung von Guss, NE-Metallen und Kunststoffen und gehärteten Stählen die Anwendungsgruppen K10 bis K30 zum Einsatz. Je nach Bearbeitungsform werden diese in Zerspanungsanwendungsgruppen

(DIN ISO 513: 2005-11) ausgewählt. Beispiele für Zerspanwerkstoffe aus Stahl sind Automatenstähle, Einsatz-, Vergütungs-, Nitrier-, Werkzeug-, gehärtete Stähle sowie nichtrostende Stähle. Für die Zerspanung von Gusseisen der Weiße und Graues Gusseisen; für die Zerspanung für Nichteisenmetallen Aluminium-, Magnesium-, Titan-, Kupfer- und Nickellegierungen; für Zerspanung von Nichtmetallen Graphit und Fasserverbundwerkstoffe [M2]. Weiterhin wird auch mit Beschichtung gearbeitet, um Randzonen härter zu machen, Des Weiteren werden beim Feinstfräsen sogenannte Cermets verwendet (also ein Verbund aus Keramik und metallischer Matrix). Auch Vollkeramiken sind schon im Einsatz, so zum Beispiel beim Schruppfräsen von Grauguss die Si_3N_4 -Keramik, beim Schlichtfräsen von Grauguss, Einsatz- und Vergütungsstählen sind Oxid- und Mischkeramiken im Einsatz. Für die in diesem Fall benutzte und getestete Schneidkeramik aus SiAlON werden beim Fräsen hohen thermische und mechanische Wechselbeanspruchungen vorhanden sein, daher muss der verwendete Werkstoff hohe Zähigkeit sowie Temperaturbeständigkeit und hohe Kantenfestigkeit aufweisen und hohe Standzeiten erreichen. Ein weiterer Vorteil bei der verwendeten Keramik ist der Verzicht von Kühlschmiermitteln. Das spart Kosten. Der Verzicht auf das Kühlschmiermedium ist sogar notwendig. Die Schneiden würden durch die starke Erhitzung und darauffolgende Abkühlung einem derartigen Temperaturschock ausgesetzt werden, dass die Keramik versagen würde. Doch durch die hohe Wärmebeständigkeit der Keramik und dem bewussten Aufschmelzen der Randzonen des Werkstückes sind diese Kühlhilfsmittel für das Zerspanen mit der Keramik als Werkzeug nicht nötig. Das spart Kosten und Aufwand.

1.2 ERLÄUTERUNG DES EINSATZGEBIETES DES FRÄSERS/ MATERIALEIGENSCHAFTEN VON SiALON

Die Schneidkeramik aus SiAlON wird für die Schruppbearbeitung von Turbinenschaufeln entwickelt, da diese Schaufel allerdings aus Nickel-Basis-Legierungen (hohe Wärmefestigkeit) bestehen, werden hohe Anforderungen an die Werkzeuge gestellt. Dies kann zum einen mit Hartmetallfräsern prozesssicher bis 20 m/min gefertigt werden, wobei die Durchmesser nach unten nicht begrenzt sind. Bei Versuchen von keramischen Wendeschneidplatten sind Schnittgeschwindigkeiten von mehr als 1000 m/min möglich, allerdings sind die Durchmesser der Werkzeuge zum derzeitigen Stand der Technik auf 16mm begrenzt. Mit dem vollkeramischen Fräser sind allerdings Schnittgeschwindigkeiten von 600m/min bei minimalen Durchmessern realisierbar. Im Moment ist eine Tendenz dahin zu erkennen, Fräser mit Durchmessern von 4 mm bis 8 mm einzusetzen. Aus diesem Grund wird hier auf das SiAlON zurückgegriffen, eine Keramik auf Basis von Si_3N_4 mit hoher Härte und sehr guter Temperaturbeständigkeit sowie guter Bruchzähigkeit,

allerdings sprödes Werkstoffverhalten und anfällig für Zugspannungen, wie alle Keramiken. Allerdings weist das SiALON eine höhere Zugspannungsfestigkeit auf. Das SiALON wird über Jahre ständig weiterentwickelt, die Gefügeausbildungen wurden verbessert und so entstand nun das neue α -SiALON, das im Gegensatz zum bisher verwendeten β -SiALON eine höhere Härte aufweisen kann. Das hier eingesetzte Materialgefüge ist eine Mischung aus α und β SiALON. [U1]

1.3 EINORDNUNG DER ARBEIT IN DAS FORSCHUNGSPROJEKT *TECHVOLK*

Das Inno-Net-Projekt „Technologie zur Herstellung vollkeramischer Schaftwerkzeuge (Tech-Volk)“ wurde Anfang 2008 ins Leben gerufen und wird in Zusammenarbeit mit Industriepartnern betrieben. Entwicklung und Optimierung von Fräsergeometrien sind ein Arbeitspaket, was schwerpunktartig vom IPK bearbeitet wird. Im Rahmen dieses Projektes wird in dieser Arbeit eine Spannungssimulation und –analyse durchgeführt. In einem ersten Schritt werden für die gewählten Geometrien geeignete CAD-Modelle erstellt, bevor dann mithilfe einer FEM Berechnungssoftware die Simulation durchgeführt wird.

1.4 AUFGABENSTELLUNG

Durchführung einer FEM-Simulation zur Auslegung von keramischen Fräsworkzeugen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll eine Methode zur Simulierung von Fräsern erstellt werden. Dabei sollen verschiedene Fräsergeometrien hinsichtlich auftretender Spannungen untereinander verglichen werden. Der Ansatz der Arbeit soll über eine Finite-Elemente-Software realisiert werden.

1.5 LÖSUNGSANSATZ

Der Ansatz zur Lösung der Aufgabenstellung wurde über folgende Punkte realisiert: Zu Beginn wird eine Einarbeitung in die Form von Auswertungen von praktischen Fräsuntersuchungen vorgenommen. Danach werden für die späteren Simulation Fräsergeometrien erstellt. Diese werden einer Belastungssimulation unterzogen. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden dann miteinander verglichen und daraus Gestaltungsempfehlungen abgeleitet.

2 VARIANTENTABELLE

Im Projekt wurden verschiedene Generationen von Werkzeuggenerationen entwickelt und getestet. Im Vordergrund stand dabei die Erhöhung der Standzeit und des Zeitspanvolumens. Dabei entstand eine Vielzahl von Geometrievarianten. In Absprache mit dem Betreuer Manuel Wacinski wurden drei dieser Geometrievarianten ausgewählt und einer Spannungssimulation unterzogen.

2.1 FRÄSERGEOMETRIEPARAMETER

Im folgenden Abschnitt werden die drei zu vergleichenden Fräsergeometrien vorgestellt und hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften klassifiziert. In Tabelle 1 sind nur eine Auswahl an Geometrieparametern aufgelistet, für den eigentlichen Herstellungsprozess durch Schleifen sind jedoch wesentlich mehr Parameter nötig, um eine optimale Geometrie zu erzeugen.

Tabelle 1: Auflistung der Fräsergeometrieparameter

	z6_d8_48 (1)	z6_d8_58 (2)	z8_d8_50 (3)
Durchmesser [mm]	8		
Zähnezahl	6		8
Nuttiefe [mm]	0,8		
Drallwinkel [°]	48	58	50
Eckenform	Kantenbruch		
1.Umfangsfreiwinkel [°]	5		
1.Stirn- Freiwinkel [°]	5		
2.Stirn- Freiwinkel [°]	15		
Fasenbreite Stirn [mm]	0,5		
Hohlschliff [°]	1,5		
Stirnspanwinkel [°]	-5		
Einstichwinkel Stirn [°]	80		

Allgemein kann man feststellen, dass alle drei Fräser den gleichen Durchmesser haben, die ersten beiden Fräser sind Sechsschneider, der dritte ist ein Achtschneider. Alle drei Fräser haben dieselbe Nuttiefe von 0,8mm und unterscheiden sich in ihren Drallwinkeln.

2.2 EINGRIFFSPARAMETER

Die Eingriffsparameter sind die Schnitttiefe a_p (4 mm für alle Geometrien), Eingriffsbreite a_e (0,2 mm für alle Geometrien) und der aus dem Drallwinkel und der Zähnezahl resultierende Gleichförmigkeitsgrad n .

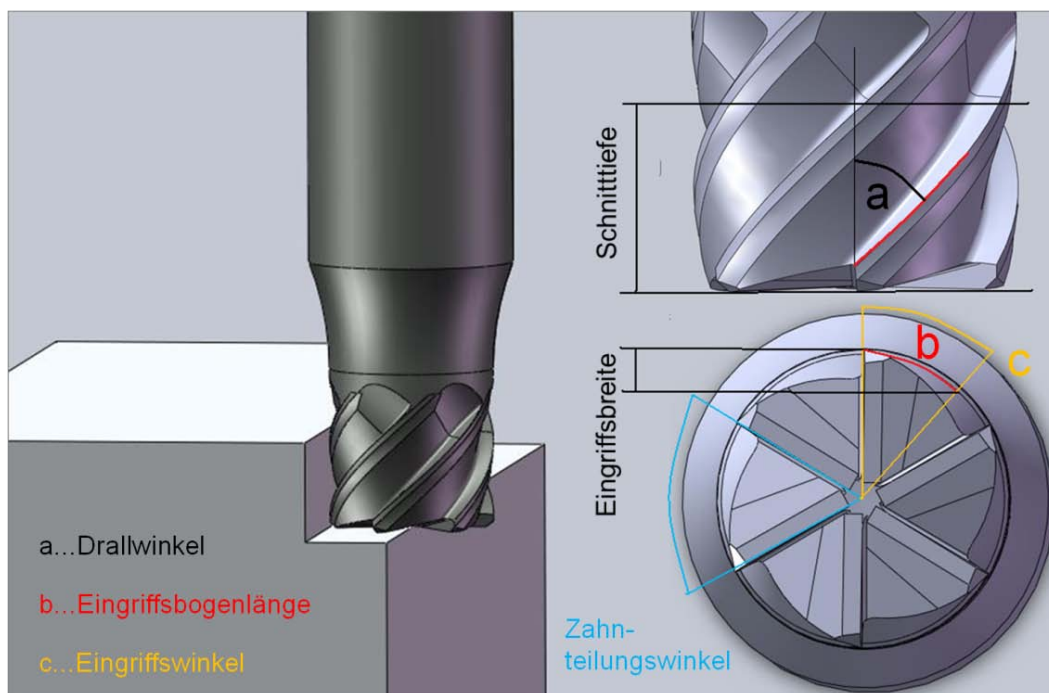


Abbildung 1: Darstellung der Eingriffsparameter des Zerspanprozesses

Der angesprochene Gleichförmigkeitsgrad berechnet sich aus der Länge der Schneide, die bei einer bestimmten Schnitttiefe im Eingriff ist und der Zahnteilung. Somit berechnet sich der Gleichförmigkeitsgrad nach folgender Formel:

$$n = \frac{l_{dach_strich}}{Zahnteilung},$$

wobei die

$$Zahnteilung = \frac{2\pi r}{Zähnezahl}$$

ist. Fräser (1) hat einen $n_1=1$, Fräser (2) einen $n_2=1,53$ und Fräser (3) einen $n_3=1,52$. Es gibt somit die Aussage darüber, wie viele Zähne/Schneiden wann im Eingriff sind. l_{dach_strich} ist der Eingriffsbereich abhängig von a_p . Dieser ist in Abbildung 2 zu sehen. Ein n

von 1 bedeutet, dass nur eine Schneide im Eingriff ist, die zweite Schneide jedoch sofort eingreift, wenn die vorherige Schneide den Eingriff verlässt. Ein n von 1,52 (bzw. 1,53) hingegen gibt Auskunft darüber, dass zwei Schneiden im Eingriff sind. Wie und wann der Eingriff stattfindet, welche Auswirkungen dies auf die Spannungen hat, wird im kommenden Kapitel erklärt.

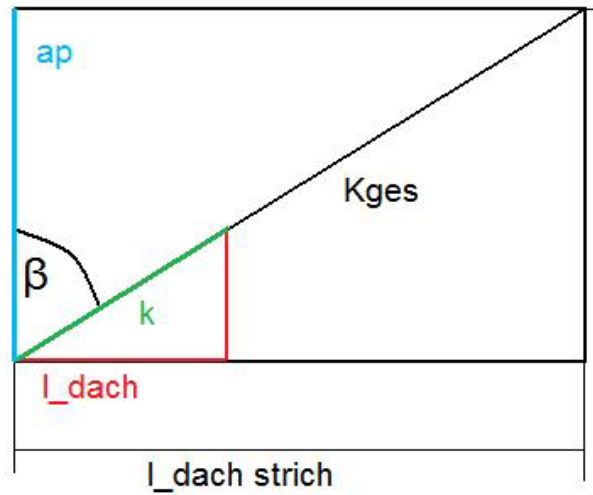


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Schneide

3 ERSTELLUNG DES CAD-MODELLES

Um eine zufriedenstellende FEM-Simulation starten zu können, ist es vorher notwendig, ein geeignetes CAD-Modell zu besitzen, was später in die FEM-Berechnungssoftware importiert wird und somit den Grundstein für die Spannungsanalyse legt. Das folgende Modell wurde mithilfe von SolidWorks 2007 (SWX) erstellt. Den Ablauf der Modellierung soll am Beispiel des z6_d8_48 (1) erläutert werden. Alle anderen Modelle sind nach gleichem Ablauf gefertigt und unterscheiden sich nur durch geometrische Parameter wie Drallwinkel, Nuttiefe und Zähnezahl voneinander.

Zur Herstellung des Modells wird zunächst ein Rohling mit den erforderlichen Maßen (10 mm Durchmesser und 70 mm Länge) modelliert. Dazu ist lediglich die Konstruktion eines Kreises mit dem Durchmesser 10mm notwendig, welcher dann über das Feature *Linear ausgetragener Aufsatz* um die gewünschte Länge ausgetragen wird.

Im zweiten Arbeitsschritt wird der Rundschliff erzeugt, bei dem der wahre Fräserdurchmesser gewählt und der

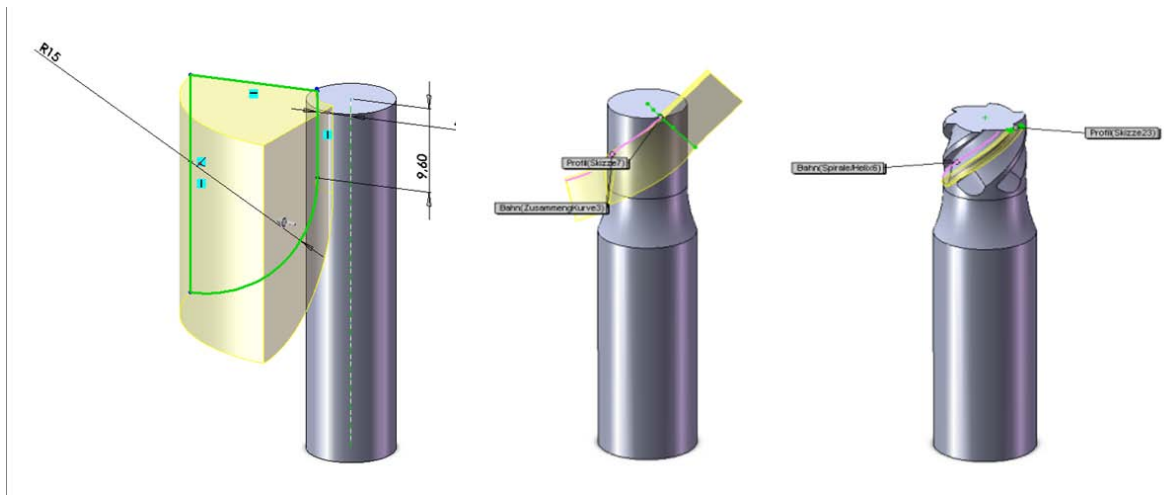


Abbildung 3: Ablauf bei der Modellierung eines CAD-Modelles

Rundschliffherzeugung, Spannutterzeugung und Erzeugung der Umfangsfreiwinkel (von links nach rechts)

zylindrische Körper für die Spannuten vorbereitet wird. Dies geschieht durch einen rotierenden Schnitt der grün angedeuteten Skizze, welche in dargestellter Variante beliebig im Raum angelegt werden kann, solange die Rotationsachse des Rohlings Teil dieser Ebene ist. In Abbildung 3 (links) ist ein rotierender Schnitt angedeutet, der Vollständigkeit halber müsste dieser allerdings 360° rotierend um den Rohling laufen, aus Anschauungszwecken wurde darauf verzichtet. Nun ist der Rohkörper entstanden.

Der darauffolgende Arbeitsschritt beinhaltet die Erzeugung der Spannut (Abbildung 3, mitte). Für diesen Schritt sind in der Vorbereitung einige Ebenen und Skizzen notwendig. Zuerst wird eine Helix erzeugt, welche mit dem Drallwinkel von $\beta=48^\circ$ identisch ist, dafür muss eine Steighöhe von 22.63mm und 0,28 Umdrehungen eingestellt werden. Dann wird zusätzlich zur Helix noch eine Verlängerung, besser der Auslauf der Helix benötigt, welche an die Helix angesteckt wird. Somit ist die Bahn (in SWX heißt diese Bahn *Zusammengesetzte Skizze*) definiert.

Nun wird eine Skizze benötigt, die die Nuttiefe definiert. Diese Skizze wird orthogonal auf den Anfang der Helix gelegt. Nun kann mit dem Feature *Austragung* die gewünschte Skizze und die zusammengesetzte Kurve angewählt und die Spannut ausgetragen werden. Da sechs Spannuten benötigt werden, wird das Feature *Kreismuster* und die gewünschte Anzahl an Spannuten und somit die Anzahl der Zähne, für das gewählte Modell sechs Zähne, erstellt. Im vierten Arbeitsschritt werden mithilfe des Kreismuster-Features sechs Spannuten erzeugt.

Im darauf folgenden Arbeitsschritt müssen die Schneiden mit Umfangsfreiwinkeln versehen werden, diese sind nötig, um Reibung zu vermeiden, welche negative Auswirkungen auf die Oberflächengüte hätte. Abbildung 3 (rechts) stellt diesen Prozess für eine Schneide schematisch dar. Dafür muss lediglich eine Skizze auf der Stirn des Fräasers erzeugt werden, welche die geforderten Winkel enthält. Dann wird das eben angesprochene Feature *Austragung* benutzt und als Profil wieder die *zusammengesetzte Kurve* aus dem vorherigen Arbeitsschritt und als Profil die eben erzeugte Skizze. Auch hier wird das Feature *Kreismuster* für die Duplizierung verwendet, um fünf weitere Umfangsfreiwinkel auf den restlichen Schneiden zu erzeugen.

Nachdem die Umfangsschneiden mit *ihren Umfangsfreiwinkeln* erzeugt wurden, müssen jetzt auf der Stirnseite Stirneinstiche erzeugt werden. Als erstes wird durch einen linearen Schnitt ein Stirneinstich erzeugt und dieser wird dann mithilfe des Kreismuster-Features weitere fünf Mal kreisförmig im gleichen Abstand auf der Stirnseite erzeugt. Abbildung 4 zeigt die fünf neuen Stirneinstiche (grün markiert).

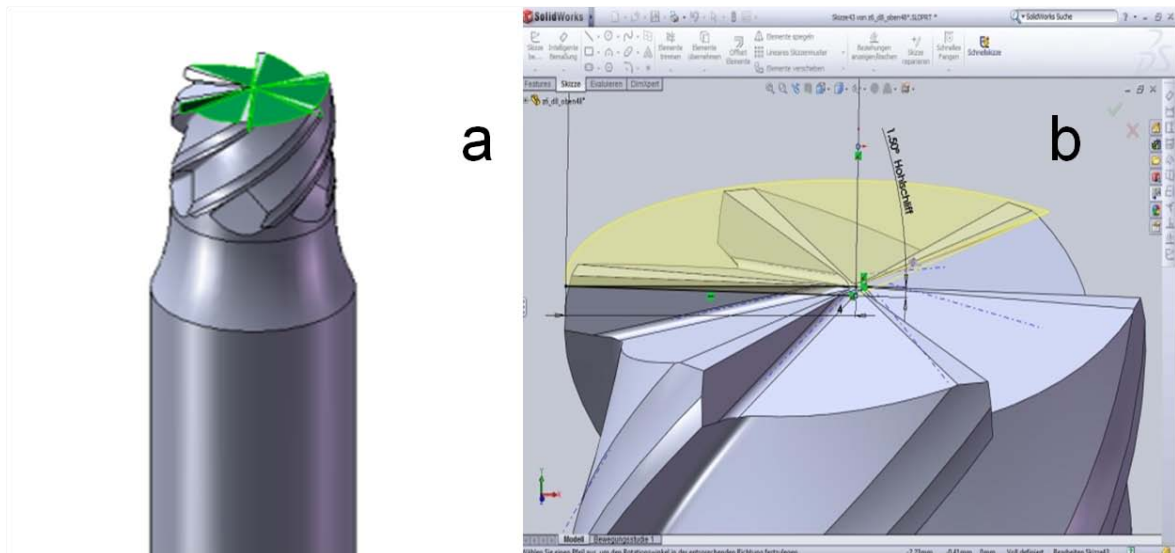


Abbildung 4: Darstellung der Freistiche eines CAD-Modelles

a: Erzeugung des Hohlsliffes, b:-erstellt in SolidWorks

Nun muss ein Hohlsliff auf der Stirnseite entstehen. Das heißt, die entstandene Schneidenseite auf der Strinseite muss sich zum Mittelpunkt des Fräasers hin um einen konkreten Betrag verjüngen. Dafür muss eine Skizze wie in Abbildung 4(b) generiert werden. Im vorletzten Schritt werden noch zwei Freiflächen auf der Stirnseite erzeugt. Auch hier wird das von SolidWorks angebotene Kreismuster-Feature für das Erstellen der restlichen fünf Freiwinkelpaare verwendet. Diesen Prozess in Worte zu fassen, ist schwierig. Deshalb ist es auch hier nochmals nötig, eine Abbildung 5 (a) zu deren Verdeutlichung einzufügen. Die erste Freifläche hat bezogen auf die Stirnseite der Schneide eine „negative“ Neigung von 5°,

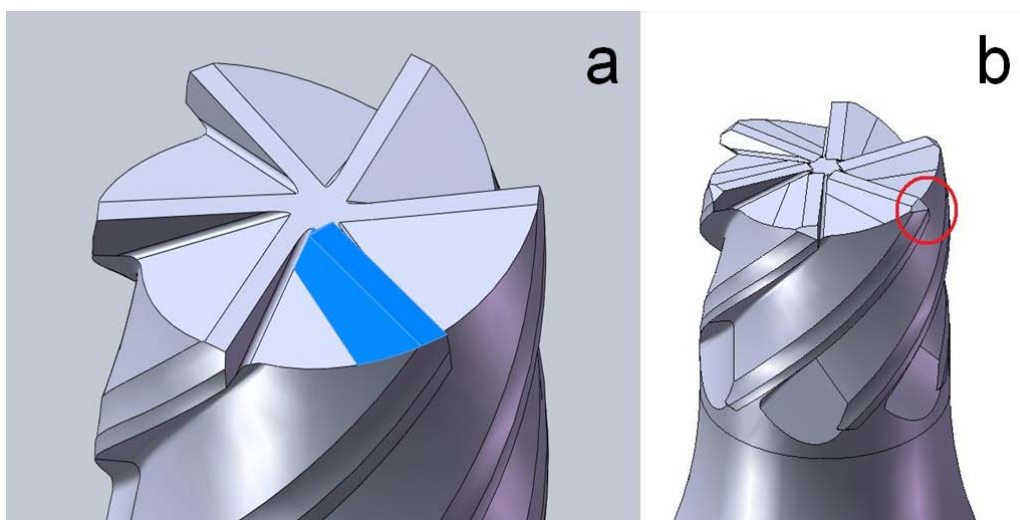


Abbildung 5: Darstellung der Freiwinkel und der Kantenbrüche eines CAD-Modelles

Dargestellt sind die Freiflächen (a) und die Kantenbrüche erstellt in Solidworks (b)

die Zweite eine „negative“ Neigung von 15° bezüglich der Ursprungsfläche. Abschließend wird an den Schneiden der Stirnseite jeweils noch ein Kantenbruch generiert, dieser ist nötig, um Verschleißerscheinungen vorzubeugen, da die Ecke, wo Stirn- und Umfangsschneide aufeinander treffen, eine der hochbeanspruchtesten Bereiche ist.

Verdeutlicht wird der erzeugte Kantenbruch in Abbildung 5 (b). Als Zusammenfassung der beschriebenen Arbeitsschritte folgt eine Bilderserie (Abbildung 6), welche die wichtigsten Arbeitsschritte noch einmal kurz zusammen fasst.

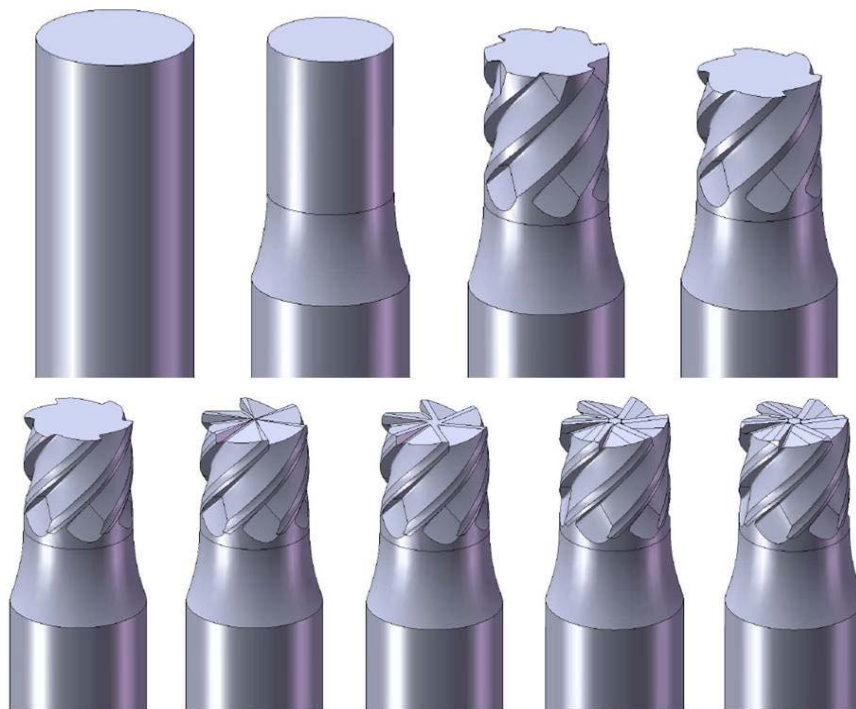


Abbildung 6: Arbeitsschrittfolge zur Erzeugung der Fräsergeometrie

Dargestellt sind Rundschliff, Spannuten; Umfangsfreiflächen, Stirneinstich, Hohlschliff, Stirnfreyflächen, Kantenbruch (von oben links nach unten rechts)

Die Beschreibung der Herstellung des CAD-Modelles ist in absoluter Knappheit aufgeführt, da eine ausführliche Erklärung dieser Schritte die Unterstützung des Programmes SolidWorks voraussetzen würde. Der Versuch, die unterschiedlichen Geometrievarianten durch parametrische Gleichungen zu versehen, um diese dann einfach durch Eingabe der Parameter zu ändern, scheiterte aufgrund der komplexen Geometrie. Dies deckt sich auch mit Erfahrungen, die bei der Herstellung der Geometrien mittels Schleifen gemacht wurden. So konnten bei manchen Geometrieausführungen zum Beispiel nur eine Umfangsfreyfläche, oder auch nur eine Stirnfreyfläche erzeugt werden. Insgesamt wurden 12 verschiedene Fräsergeometrien angefertigt, aus denen nach Absprache mit dem Betreuer drei Fräser (siehe Kapitel „2.Variantentabelle“) für die folgende Spannungsanalyse ausgewählt wurden.

4 ERMITTLUNG DER KRÄFTE AUS DEM VERSUCH

4.1 ZWECK UND BEDEUTUNG DES VERSUCHES

Beim Fräsen von hochfesten Legierungen entstehen hohe Belastungen für das Werkzeug und dessen Material. Deshalb ist es wichtig, die während des Zerspanprozesses auftretenden Kräfte zu kennen, um abschätzen zu können, welchen Belastungen der Fräser unterliegt. Aus diesem Grund werden mithilfe dieses Versuchsaufbaues die Kräfte, welche von außen auf den Fräser wirken, aufgenommen.



Abbildung 7: Überblick des Versuchstandes

4.2 VERSUCHSEINRICHTUNG (VERSUCHSSTAND UND EINGESETZTE GERÄTE)

Der Versuchstand (Abbildung 7) befindet sich im Fraunhofer IPK in Berlin und besteht aus der Präzisionsfräsmaschine „Mirkomat“ mit vertikaler Arbeitsspindel und einer starren Bauweise [B1]. Weitere Komponenten sind eine Aufnahme für den Fräser, eine Messplattform für die Aufnahme von Kraftsignalen (x,y,z-Signale) mit piezoelektrischen Sensoren, die Messverstärker (3 Stück für x, y und z-Signale), einem Multifunktions-Datenerfassungsgerät, einem geschirmten BNC-Anschlussblock, einer Auswertungssoftware LabVIEW und den entsprechenden Verbindungskabeln. Ein Aufbau ist in Abbildung 8 zu sehen.

Hier noch einmal die **Komponenten** in aufgelisteter Form:

- Mikromat 10V HSC inklusive Spindelaufnahme für den Fräser
- Messplattform, Kistler (Typ 9257B)
- 3 Ladungsverstärker, Kistler (Charge Meter 5015)
- Multifunktions-Datenerfassungsgerät der M-Serie mit 16 bit und 1,25 MS/s, extern gespeist (NI USB 6251)
- geschirmter BNC-Anschlussblock (NI BNC 2110)
- Splitter, Kistler (Type 5407A)
- Verbindungskabel
- Auswertungssoftware LabVIEW 8.5

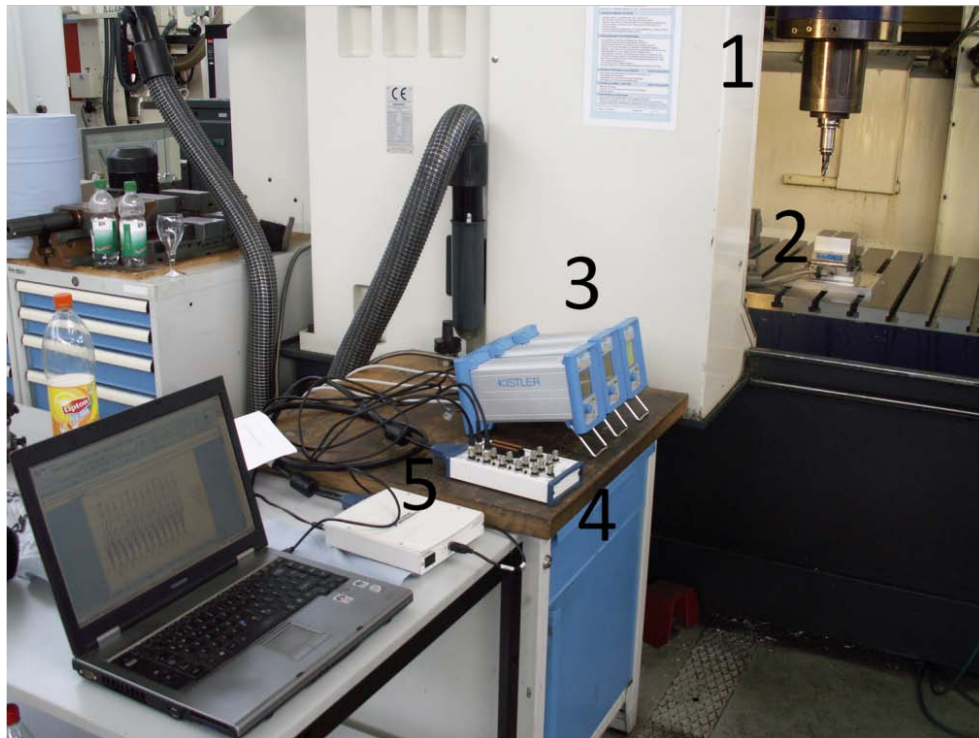


Abbildung 8: Aufbau des Versuchsstandes

Bestehend aus Mikromat (1), Messplattform (2) Messverstärker (3), Multifunktionsdatenerfassungsgerät und BNC-Anschlussblock (5)

4.3 VERSUCHSVORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG

Zur Vorbereitung des Versuches wird ein Ablaufplan für die Verfahrwege der Spindel zu programmieren. Dann ist die korrekte Einspannung des Werkstückes auf der Messplattform und dem Führungstisch der Mikromat notwendig. Um repräsentative Ergebnisse zu bekommen, wird die Zerspanebene vorher mit einem Hartmetallfräser plangefräst. Vor Beginn muss die Messplattform über den Splitter mit den drei Ladungsverstärkern verbunden werden. Das netzbetriebene Ladungsmeter nimmt die vom piezoelektrischen Sensor abgegebene Ladung auf und wandelt diese in eine proportionale Spannung um. Diese analogen Signale werden über den geschirmten Anschlussblock und dem Multifunktions-Datenerfassungsgerät in ein digitales Signal

umgewandelt und über eine USB-Schnittstelle direkt in die LabVIEW-Software eingespeist [B1].

Wenn ein Versuch durchgeführt wird, muss zuerst die Spindeldrehzahl erreicht werden, dann verfährt die Spindel mit dem Fräser in der definierten Vorschubgeschwindigkeit und fräst mit den Umfangsschneiden in einer definierten Schnitttiefe sowie Zustellung entlang einer 100 mm langen Bearbeitungsbahn an einem Werkstück aus einer warmfesten Nickelbasis-Legierung. Die hierbei entstandenen Kräfte werden über die Messplattform an die Ladungsverstärker weitergegeben. Die Signale werden digitalisiert und können dann mittels eines geeigneten LabVIEW-Projektes ausgewertet beziehungsweise die Datensätze abgespeichert und mithilfe von (zum Beispiel) Microsoft Excel ausgewertet werden.

4.4 VERSUCHSERGEBNISSE

Die ermittelten Ergebnisse auf dem Programm LabVIEW 8.5 werden gespeichert und danach mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes wie Microsoft EXCEL ausgewertet. In Abbildung 9 sind die Kraftsignale für eine Messung (also eine Durchfahrt des Fräasers) dargestellt, das dritte Signal (rot) ist durch das grüne Signal verdeckt. Das Kraftsignal kann nun analysiert werden, dabei ist es sinnvoll, sich vorerst einmal eine Umdrehung des Fräasers anzuschauen. Die Peaks der Graphen sind die Zähne, am Beispiel des in Abbildung 10 zu sehenden Signalverlaufes sind es sechs Zähne. Die unterschiedlichen Amplituden könnten ein Hinweis auf den Verschleiß sein. Die blaue Kurve stellt die Radialkomponente dar. Nun kann man die gesamten Messdaten der einzelnen Messungen zusammenfügen und sich den Verlauf der Kräfte bei wachsender Standzeit anschauen. Diese Kurven können dann mit den Ergebnissen anderer Fräsergeometrien (unterschiedliche Zähnezah, Drallwinkel, Nuttiefe) verglichen werden. Aus den gewonnenen Kraftsignalen kann nun für die FEM-Spannungssimulation die gemessene Kraftkomponente verwendet werden, um diese in der Simulation als Randbedingung zu definieren. Wie die Kraftsignale aussehen, wird im Kapitel 6 „Diskussion der Art der Last“ beschrieben.

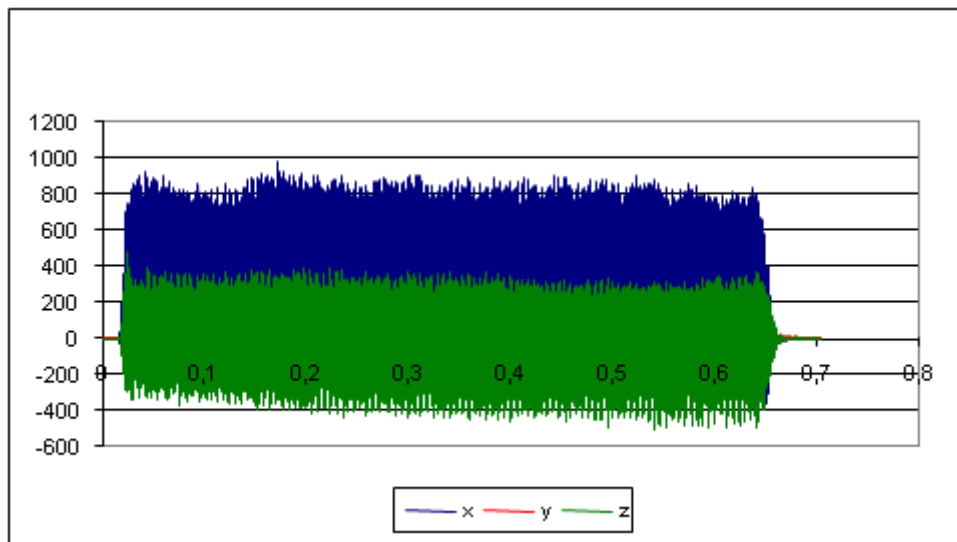


Abbildung 9: Kraftsignale aus der Messung

Dargestellt ist ein Anschauungsbeispiel in EXCEL, y-Achse: Kraft[N], x-Achse: Zeit [s].

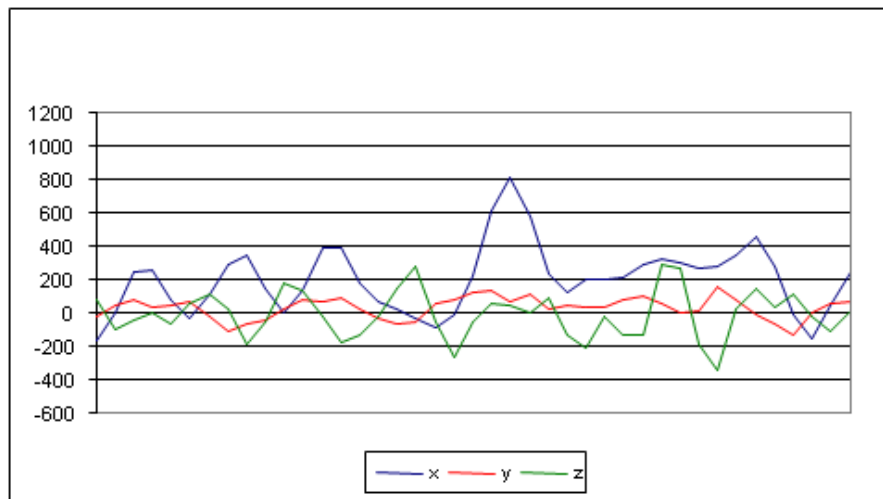


Abbildung 10: Signaldarstellung der einzelnen Kraftkomponenten

Dargestellt ist eine Umdrehung (blau-radial, grün-tangential, rot-axial).

5 FEM-MODELLIERUNG

Im folgenden Kapitel soll die Vorgehensweise bei der Verwendung der Finite-Elemente-Software Ansys WORKBENCH 12.1 für die Spannungsanalyse aufgeführt werden. Schwerpunkte werden dabei der Import des CAD-Modelles, die Einspannung des Fräasers, die Vernetzung und die Implementierung der Kräfte auf die Schneiden des Fräasers sein. Die folgenden Schritte werden anhand der Fräsergeometrie z6_d8_48 (siehe auch Kapitel 2, Variantentabelle) erläutert.

5.1 IMPORT UND VORBEREITUNG DES ANSYS WORKBENCH PROJEKTES

Der Import des CAD-Modelles in die Berechnungssoftware ist eine der wichtigsten und nicht immer einfachsten Arbeitsschritte des Anwenders. Da das CAD-Modell in SolidWorks2007 erstellt wurde, musste eine Möglichkeit gefunden werden, dieses in die Workbench zu importieren, ohne dabei Flächen- oder Volumenkörperfehler zu produzieren. Der erste Versuch galt allerdings dem Importieren des CAE-Modelles aus dem Programm VeriCUT. Die VERICUT-Software simuliert die NC-Bearbeitung, um Fehler in der Werkzeugbahn und ineffiziente Bewegungen zu erkennen. Die dabei entstandene Geometrie wurde versucht, in Ansys Classic zu importieren. Dies brachte aber kein zufriedenstellendes Ergebnis, da besagte Volumenkörperfehler sowie Flächenfehler auftraten. Im zweiten Versuch wurde versucht, die Geometriedatei aus SOLIDWORKS (.SLDASM) nach deren Konvertierung in IGES – beziehungsweise STEP-Dateien in Ansys Classic zu importieren. Doch dies brachte keine befriedigenden Ergebnisse hinsichtlich der entstandenen Volumenkörper, da diese diverse Flächenfehlstellen und -lücken aufwiesen. Diese Probleme führten dazu, die Workbench 12.1 von Ansys zu benutzen, um schließlich zu folgendem Ablauf zu kommen:

Im ersten Schritt wird die in SolidWorks 2007 erstellte Baugruppe in SWX geöffnet und über die angebotene Schnittstelle in der Menüleiste direkt in Ansys Workbench 12.1 (AWB) importiert. Es ist somit keine manuelle Dateikonvertierung in andere Formate wie IGES oder STEP nötig und der Import verläuft reibungslos und der Volumenkörper hat trotz komplexer Geometrie keine Fehlstellen. In AWB wird in einem neuen Projekt ein Geometriesymbol eingeblendet, welches die importierte Geometrie beinhaltet. Um eine neue Analyse zu starten, muss diese zuerst gewählt werden. Unter den Analyse-Typen wurde die transiente Strukturanalyse (Transient Structural) durch Doppelklick oder ziehen dieser per Drag and Drop im rechten Projekt-Fenster erzeugt. Jeder Analysetyp besteht aus 6 Komponenten (*Engineering Data, Geometry, Model, Setup, Solution* und *Results*),

auf welche noch eingegangen wird. Nun stehen beide Fenster im Projekt zur Verfügung, allerdings sind sie noch nicht verbunden. Das geschieht problemlos durch einfaches Ziehen der Geometrie-Komponente des einen mit dem des anderen Systems (siehe Abbildung 11). Nun werden die Materialdaten eingegeben, dazu ein Doppelklick auf die

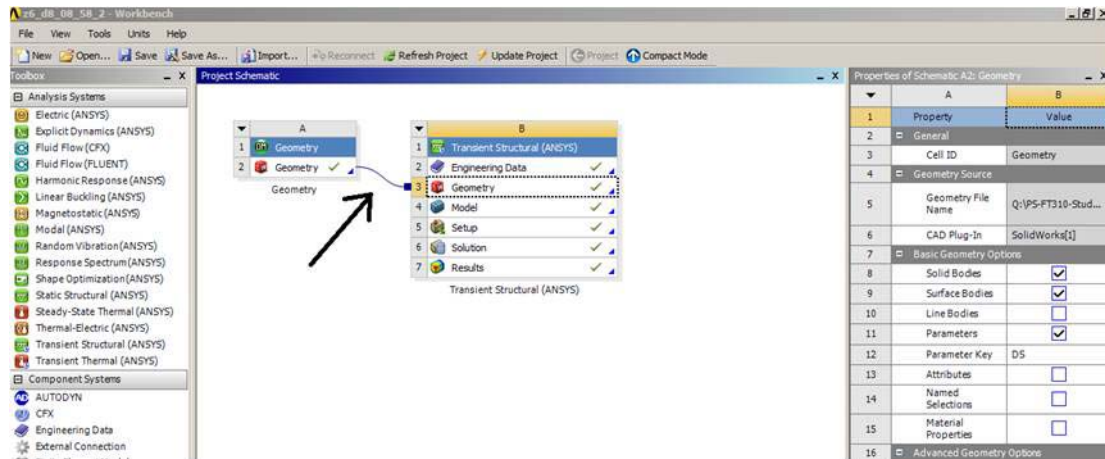


Abbildung 11: Benutzeroberfläche der Ansys Workbench
Verbindung von Geometrie mit dem Analysetypen

Engineering Data. Hier wurden folgende Materialparameter für die anschließende Analyse definiert:

Tabelle 2: Materialdaten und Kennwerte des SiAlON

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Dichte	3,6 g/cm ³
Druckfestigkeit	3000 MPa
Biegefestigkeit	900 MPa
Elastizitätsmodul	340.000 N/mm ²
Poisonzahl	0,25
(Umgebungstemperatur)	(20°C)

Die Materialdaten sind aus dem „Werkstoffdatenblatt für heissgepresstes Siliciumnitrid/Titannitrid“ der Firma FCT Ingenieurkeramik GmbH (siehe Anhang) entnommen. An dieser Stelle soll vorab kurz über die Relevanz der Materialdaten diskutiert werden. Bei einer transienten Strukturanalyse entstehen die Feldgrößen *Verschiebung*, *Spannung* und *Dehnung*. Diese stehen in unmittelbarer Verbindung miteinander. So sind die Dehnungen die partiellen Ableitungen der Verschiebungen in allen drei Raumrichtungen [G2]. Die Verbindung zwischen Spannungen und Dehnungen

sind im Hooke'schen Gesetz $\sigma = E \cdot \epsilon$) verankert. Dieses Gesetz koppelt im isotropen Fall den Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl (Poissonzahl). Andere Materialeigenschaften wie Druck- und Zugfestigkeiten sind für den hier beschriebenen Fall eher unwichtig, da diese das Programm lediglich für die Berechnung von Sicherheitsfaktoren oder Streckgrenzenauslastungsfaktoren benötigt. Auch die Umgebungstemperatur ist für diesen Fall überflüssig, da es keine thermischen Analysen, Wärmeübergänge oder sonstiges zu berechnen gibt. Nachfolgend werden die Analyse-Komponenten erläutert, da das der wesentliche Unterschied zum gewöhnlichen Ansys Classic darstellt. Jeder Analysetyp besteht aus sechs Komponenten, welche vorzugsweise von oben nach unten Abzuarbeiten sind.

Engineering Data:

Diese Komponente ist zur Definierung der Materialdaten der Baugruppe vorgesehen. Wenn keine Materialdaten eingegeben werden, wird ein Standardmaterial verwendet.

Geometry:

Hier können die nativen Daten eines CAD-Systems eingeladen, neutrale Daten wie IGES, STEP, Parasolid und ACIS importiert, Geometrien mit dem Ansys *Design Modeler* erstellt oder eben wie in diesem Fall über ein in einem CAD System geladenes Modell übernommen werden.

Model:

Die Definitionen, die neben der Geometrie notwendig sind, um ein FE-Model zu beschreiben, also Vernetzung, eventuelle Kontakte, oder lokale Koordinatensysteme werden hier zusammengefasst.

Setup:

Die Analyse-Art, die Analyseereinstellungen, die Belastung und sonstige Randbedingungen werden hier zusammengefasst.

Solution:

Hier sind die Rückmeldungen des Gleichungslösers sind unter der Lösung verfügbar

Results:

Hier sind die durch die FEM –Analyse ermittelten Ergebnisse zu finden [G1]

5.2 EINSpannung

Die Einspannung ist sehr schnell und einfach erledigt. Da vorher eine Baugruppe modelliert wurde, in der das zweite Teil der Länge der Einspannlänge (30mm) entspricht, kann mithilfe des Flächenselektierungs-Werkzeuges die Mantelfläche ausgewählt und ihr eine FIXIERTE LAGERUNG zugewiesen werden (Abbildung 12). Wichtig ist, dass nur die

im Bild markierte Fläche zur Lagerung gewählt wird, da diese im Spannfutter ebenfalls nur an dieser Stelle eingespannt und damit fixiert wird.

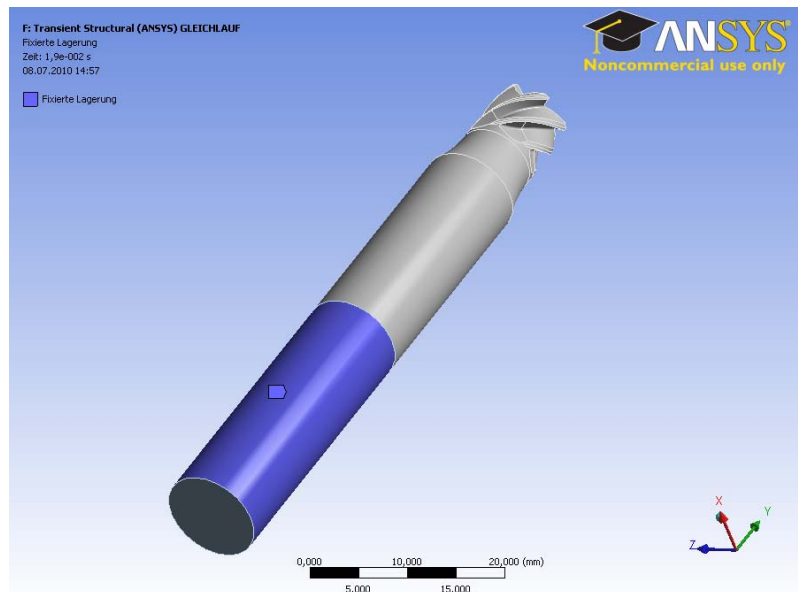


Abbildung 12: Einspannung des Fräasers (Fixierte Lagerung)

5.3 VERNETZUNG

Die Vernetzung, also das Zerlegen der Geometrie in einfache kleine Elemente, welche an den Knoten (und Mittelknoten, falls vorhanden) miteinander verbunden sind, ist das Herzstück der FE-Methode. Bis in die neunziger Jahre war es nötig, aufgrund von geringer Rechenleistung die Anzahl der Elemente und somit Knoten so gering wie möglich zu halten, was natürlich Auswirkungen auf die Genauigkeit der Analyse hatte. Heute kann mit höherer Rechenleistung auch eine höhere Netzdichte, also geringere Elementgröße, realisiert werden. Hier ist dokumentiert, inwiefern vernetzt und wo Verfeinerungen vorgenommen wurden. AWB bietet zwei Arten der Vernetzung an, einmal die *adaptive Vernetzung* und die *manuelle Vernetzung* [G1]. Bei der adaptiven Vernetzung wird das Netz dem Spannungszustand angepasst. Dies kann bei einer transienten Berechnung zu sehr langen Rechenzeiten führen, da der Spannungszustand sich mit jedem Lastschritt ändert, die Randbedingungen sich ändern und somit das Netz bei jedem Zeitschritt neu berechnet werden muss. Aus diesem Grund wurde der manuelle Vernetzungstyp gewählt und die Bereiche, die für die Berechnung besonders relevant sind, eigenständig (manuell) verfeinert. Außerdem kommt bei einer adaptiven Vernetzung erschwerend hinzu, dass sich nach jeder Netzanpassung die Koordinaten der Knoten ändern würden, was für den hier beschriebenen Fall bezüglich der Kraftaufbringung nicht günstig wäre, da es die verwendete Methode der Kraftaufbringung unterbinden würde. Es

werden bei der (manuellen) Vernetzung fünf verschiedene Vernetzungsbereiche auftauchen (Abbildung 13). Im ersten Schritt wird die gesamte Baugruppe außer dem Schneidenbereich selektiert und im Menü Vernetzung wird die *Elementgröße* als Vernetzungstyp gewählt. Dieser Typ erlaubt es, eine beliebige Elementgröße zu wählen, im konkreten Fall 1 mm. Im zweiten Schritt wird eine zweite *Elementgröße* eingeführt, jetzt wird der komplette Schneidenbereich selektiert und mit der Elementgröße 0,2 mm versehen, da im Schneidenbereich mit den größten Spannungsgradienten zu rechnen ist und somit eine höhere Genauigkeit in den Ergebnissen gewünscht wird. Da die Kräfte nach der Vernetzung auf drei Schneiden gelegt werden sollen, wird an diesen Schneidkanten (jeweils Verfeinerungstyp 1 in AWB) explizit vernetzt, in einer weiteren Verfeinerung jeweils die Flächen vor und hinter den Schneidkanten (Umfangsfreiflächen sowie der Schneidengrund). Durch den *Netz-erstellen*-Button wird das Netz generiert. Durch die Verfeinerung auf der Schneidkante ist jetzt ein Netz mit nahezu regelmäßigem Knotenabstand trotz unregelmäßiger Geometrie entstanden [Abbildung 13 (f)]. Das ist wichtig für den kommenden Abschnitt, das Aufbringen der Kräfte. Es wurde auch versucht, die Schneide mittels der Vernetzungsvariante *Strukturiertes Netz* (Mapped Mesh) zu vernetzen, doch konnte AWB keine zufriedenstellenden Ergebnisse aufgrund der speziellen Geometrie liefern. Der von Ansys gewählte Elementtyp für die Vernetzung ist Solid 186 für den Einspannbereich und Solid 187 für den zweiten Bereich (Schneidenbereich). Das Solid186 Element ist ein dreidimensionales Quaderelement mit 20 Knoten. Solid 187 ist ein dreidimensionales tetraedisches Element mit 10 Knoten. Diese Knoten sind in den Ecken und Kantenmitten angeordnet. In Abbildung 13 sind die verschiedenen Netzapplikationen noch einmal grafisch dargestellt. Links oben (a) ist die erste Vernetzungsstufe zu sehen, darunter die Verfeinerung des Schneidenbereiches (b), gefolgt von der Kantenverfeinerung (c), durch die Linien Selektion allerdings schlecht zu erkennen. Danach die Umfangsfreiflächen sowie der Schneidengrund (d) und (e). Und Bereich (f) stellt die erstellte Vernetzung nach der Netzgenerierung dar.

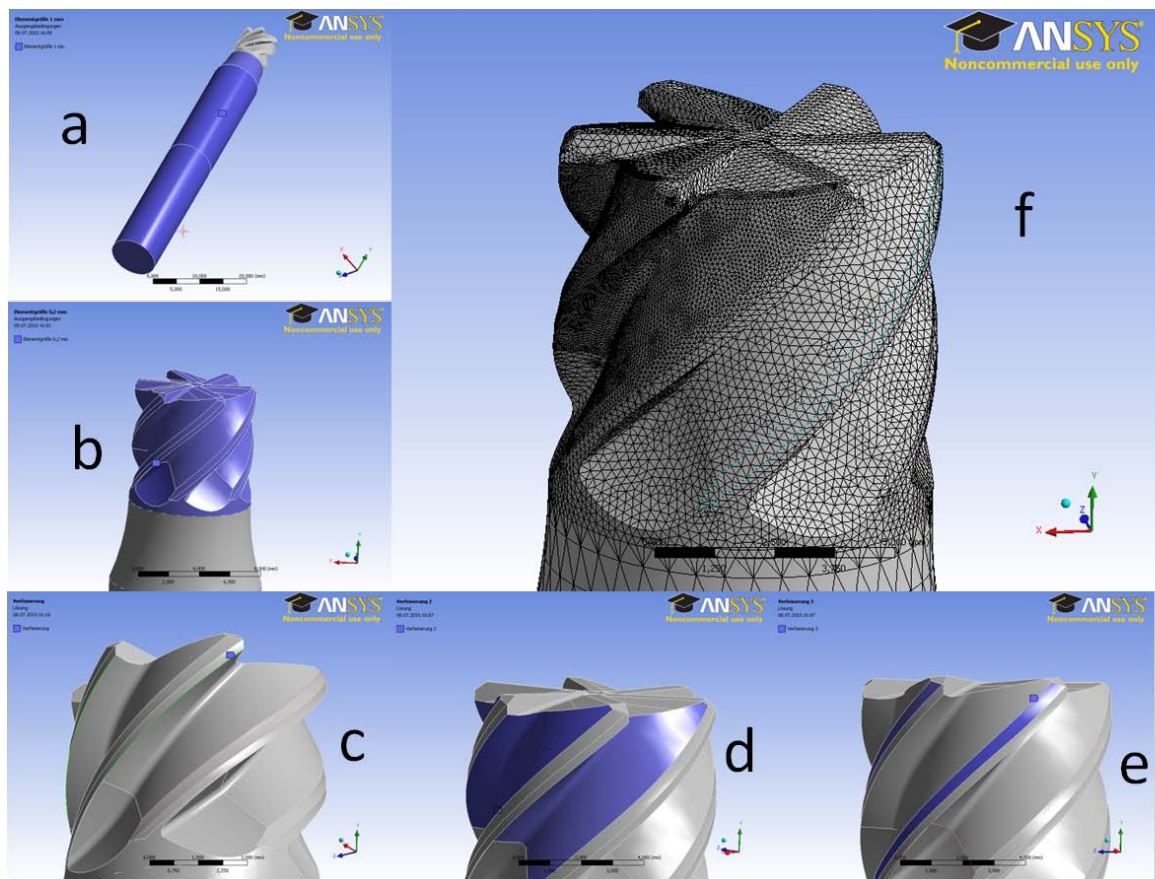


Abbildung 13: Vernetzungsbereiche der Fräsergeometrie
Dargestellt sind die einzelnen Bereiche der Vernetzung (a-e) sowie das daraus generierte Netz (f)

5.4 AUFBRINGEN DER KRÄFTE AUF DIE SCHNEIDE

Das Aufbringen der Kräfte stellte die größte Herausforderung dar. AWB stellt für die Aufbringung von Lasten anwenderfreundliche Features zur Verfügung, die es dem Anwender ermöglichen, einfache Lastverhältnisse unkompliziert zu simulieren und auf die Modelle zu übertragen. In konkreten Fall waren diese einfachen Features nicht verwendbar, da der Lastfall, welcher beim Fräsen auftritt, komplex ist und sich mit den gebotenen Features nicht darstellen lassen. Die Komplexität beim Fräser besteht in der zeitlich veränderten Position der Last auf der Schneide (Abbildung 14). Außerdem besteht die Last aus einer x-, y- und einer z-Komponente. Die in Abbildung 14 schematisch dargestellte Last ist eine resultierende Kraftfunktion aus den drei genannten Kraftkomponenten. Die Dreieckslast tritt am Kantenbruch der Schneide mit ihrem Maximalwert ein (beim Gegenlaufräsen wäre es der Minimalwert) und bewegt sich während der Rotation des Fräasers im Kontaktbereich k_{ges} (siehe auch

Abbildung 2) der Schneide entlang.

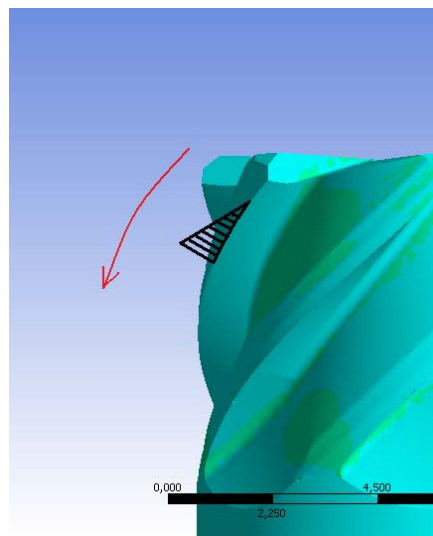


Abbildung 14: Darstellung der resultierenden Dreieckslast und deren Bewegungsrichtung

Der Kontaktbereich k_{ges} ist geometrieabhängig und berechnet sich wie folgt:

$$k_{ges} = \frac{ap}{\cos\beta},$$

wobei a_p die Schnitttiefe des Fräasers und β der Drallwinkel ist. Somit ergibt sich für ein $a_p=4$ mm und einem Drallwinkel $\beta = 48^\circ$ ein Eingriffsbereich von

$$k_{ges(1)} = 5,98 \text{ mm}.$$

Dies ist der Bereich, den die Kraft während der Rotation auf der Schneide entlang läuft. Nun zur Auslegung der Dreieckslast (Diskussion der Dreieckslast und deren Herleitung in „6 Diskussion der Art der Last“). Diese wird durch geometriespezifische Eigenschaften bestimmt. Zum einen durch ihre Länge k , zum anderen durch ihren Betrag, der Kraft unter der beschriebenen Funktion. Aus den Messergebnissen entstanden radiale (x-Komponente bezogen auf globales Koordinatensystem in AWB), tangentiale (z-Komponente) sowie axiale Komponenten (y-Komponente). Für diese Kraftkomponenten muss nun jeweils eine Dreiecksfunktion beschrieben werden. Zu aller erst bestimmt man die Länge k des aufgespannten Dreiecks. Diese berechnet sich wie folgt:

$$k = \frac{l_{dach}}{\sin \beta},$$

wobei

$$l_{dach} = \frac{\alpha \cdot 2\pi \cdot r}{360}$$

ist. Der Eingriffswinkel

$$\alpha = \arccos(1 - a_e / r)$$

ist der Bereich, der bei einer definierten Schnitttiefe a_e des Fräasers entsteht.

Somit ergibt sich $k = 1,71 \text{ mm}$ (Abbildung 15).

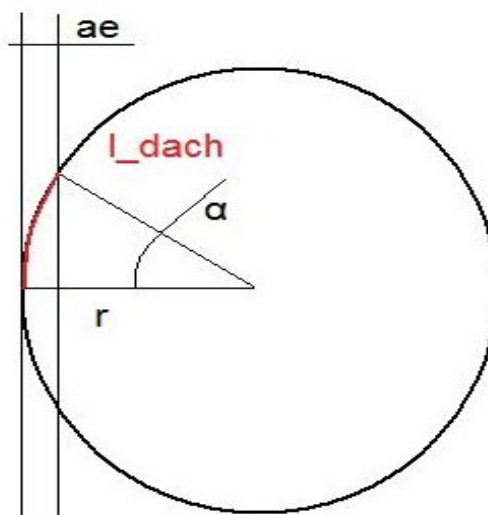
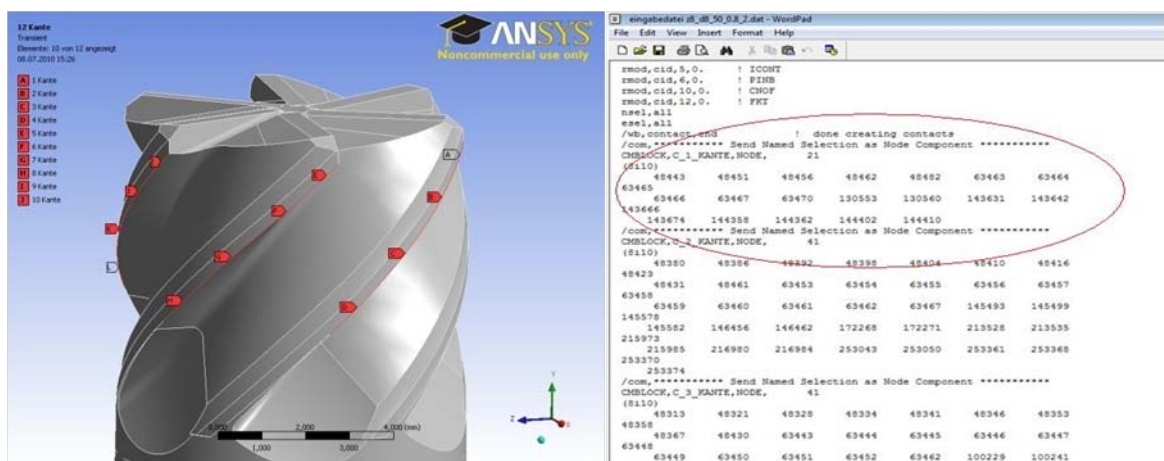


Abbildung 15: Skizze zur Verdeutlichung des Einflusses von a_e auf l_{dach}

Nun wird eine Möglichkeit gesucht, eine Dreieckslast auf diese Länge k zu legen. Nach etwas Überlegung ist folgender Lösungsalgorithmus dabei entstanden:

Da das nahezu konstante Netz (auf Knotenabstand bezogen) auf der Schneide mit seinen Elementen und Knoten verwendet werden soll, aber die Koordinaten und Knotennummern dieser Knoten nicht bekannt sind, wurden von jeder zu betrachteten Schneide, welche wiederum in Liniensegmente unterteilt ist, Komponenten erstellt (Abbildung 16). Das geht problemlos über anklicken der zu wählenden Linie auf der Geometrie, Rechtsklick und „Komponente erstellen“. Der Vorteil davon ist, dass man sich nach Erstellen dieser Komponenten eine sogenannte *EINGABEDATEI* von AWB auslesen lassen kann. Diese beinhaltet alle Informationen der Analyse (Preprocessor, Solution und Postprocessor), die in einem herkömmlichen Quelltext für Ansys Classic auch enthalten sind, natürlich auch die Knoten der erstellten Komponenten. Wenn man diese Knoten hat (*cmblock* als Suchbegriff im Quelltext eingeben), muss man nur noch die Koordinaten (x,y,z) der Knoten aus der Eingabedatei heraussuchen. Abbildung 16 (rechts) zeigt die Knotennummern eines Liniensegmentes (rot markiert) aus dieser Eingabedatei. Die Längen der Liniensegmente wurden in SolidWorks gemessen und notiert. Aus der Länge der einzelnen Liniensegmente und der Anzahl der Knoten kann man den mittleren Abstand der Knoten berechnen. Im Beispiel z6_d8_48 ist dieser ~ 0,06 mm. Nun wird die Länge k der Dreieckslast durch 0,06 geteilt und man erhält somit die Anzahl der Knoten, welche den Bereich für die Dreieckslast eingrenzen. Hier sind das (aufgerundet) 30 Knoten.



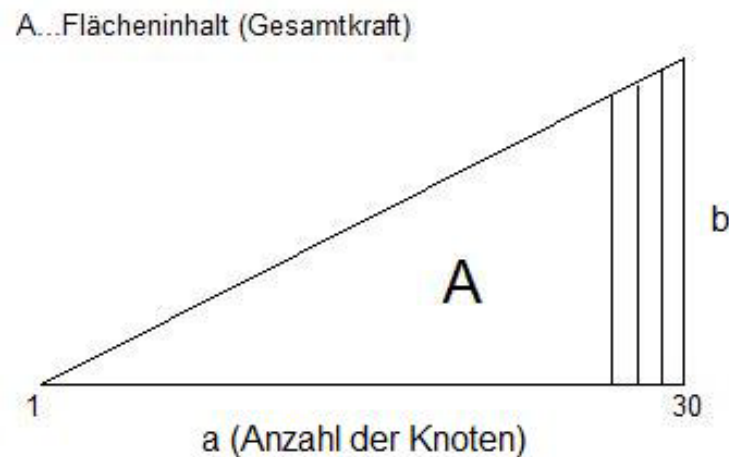


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Dreieckslast

Jetzt wird die Größe der Einzellasten benötigt, welche auf den Knoten 1 bis 30 liegen sollen. Diese Berechnung wird nun für die radiale, axiale und tangentielle Kraftkomponente des Modells z6_d8_48 (1) durchgeführt. Dafür wurde erst einmal die Formel zur Berechnung des Flächeninhaltes eines rechtwinkligen Dreieckes hergenommen und nach der unbekannten Ankathete b (Abbildung 17) umgestellt:

$$A = \frac{a \cdot b}{2} ,$$

somit ist

$$b = \frac{2A}{a} = 66,7 \text{ (N)}$$

mit $A = 1000\text{N}$, ermittelt aus den Versuchen. Somit kann für die Hypotenuse eine Funktion

$$y = mx + n \text{ (n= 0)}$$

Erstellt werden. Der Anstieg m errechnet sich aus

$$m = \frac{b}{a} = \frac{66,7}{30} = 2,22 .$$

Somit ergibt sich eine Funktionsgleichung

$$y = 2,22x \text{ (x) ,}$$

mit der man sich für jeden Knoten 1 bis 30 die dazugehörige Einzelkraft berechnen kann.

Tabelle 3: Einzelkräfte der radialen Kraftkomponenten mit Variablenzuweisung

Zugeordnete Variable in Ansys	Einzelkraft [N]	Zugeordnete Variable in Ansys	Einzelkraft [N]
a1	2,22	a16	35,52
a2	4,44	a17	37,74
a3	6,66	a18	39,96
a4	8,88	a19	42,18
a5	11,1	a20	44,4
a6	13,32	a21	46,62
a7	15,54	a22	48,84
a8	17,76	a23	51,06
a9	19,98	a24	53,28
a10	22,2	a25	55,5
a11	24,42	a26	57,72
a12	26,64	a27	59,94
a13	28,86	a28	62,16
a14	31,08	a29	64,38
a15	33,3	a30	66,6

In Tabelle 3 sind die Einzelkräfte für die radiale Dreieckslast aufgelistet. In gleicher Abfolge werden nun die Einzelkräfte für die tangentialen Einzelkräfte errechnet.

$$A = \frac{a \cdot b}{2}$$

somit ist

$$b = \frac{2A}{a} = 20 \text{ (N)}$$

mit $A = 300 \text{ N}$, Anzahl der Knoten bleibt gleich. Somit kann für die Hypotenuse eine Funktion

$$y = mx + n \text{ (n=0)}$$

erstellt werden. Der Anstieg m errechnet sich aus

$$m = \frac{b}{a} = \frac{20}{30} = 0,67 \text{ .}$$

Somit ergibt sich eine Funktionsgleichung

$$y = 0,67 x .$$

Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Analog dazu die Funktionsgleichung für die Bestimmung der *axialen* Einzelkräfte: Die Gesamtkraft beträgt $A=50 \text{ N}$.

$$A = \frac{a \cdot b}{2} ,$$

somit ist

$$b = \frac{2A}{a} = 3,33 (N) .$$

Anzahl der Knoten bleibt wieder gleich. Somit kann ich mir für die Hypotenuse eine Funktion $y = mx + n$ ($n=0$) erstellen. Den Anstieg m errechnet sich aus

$$m = \frac{b}{a} = \frac{3,33}{30} = 0,11 .$$

Somit ergibt sich eine Funktionsgleichung

$$y = 0,11 x$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 4: Einzelkräfte der tangentialen Kraftkomponenten mit Variablenzuweisung

Zugeordnete Variable in Ansys	Einzelkraft [N]	Zugeordnete Variable in Ansys	Einzelkraft [N]
b1	0,67	b16	10,67
b2	1,33	b17	11,33
b3	2,00	b18	12,00
b4	2,67	b19	12,67
b5	3,33	b20	13,33
b6	4,00	b21	14,00
b7	4,67	b22	14,67
b8	5,33	b23	15,33
b9	6,00	b24	16,00
b10	6,67	b25	16,67
b11	7,33	b26	17,33
b12	8,00	b27	18,00
b13	8,67	b28	18,67
b14	9,33	b29	19,33
a15	10,00	b30	20,00

Tabelle 5 Einzelkräfte der axialen Kraftkomponenten mit Variablenzuweisung

Zugeordnete Variable in Ansys	Einzelkraft [N]	Zugeordnete Variable in Ansys	Einzelkraft [N]
c1	0,11	c16	1,78
c2	0,22	c17	1,89
c3	0,33	c18	2,00
c4	0,44	c19	2,11
c5	0,56	c20	2,22
c6	0,67	c21	2,33
c7	0,78	c22	2,44
c8	0,89	c23	2,56
c9	1,00	c24	2,67
c10	1,11	c25	2,78
c11	1,22	c26	2,89
c12	1,33	c27	3,00
c13	1,44	c28	3,11
c14	1,56	c29	3,22
c15	1,67	c30	3,33

Nun kann der eigentliche Teil, das Aufbringen der Kräfte auf die Schneide, beginnen. Es ist bekannt, dass die Dreieckslast vereinfacht aus dreißig Einzellasten besteht. Beim Eintritt der Schneide ins Material ist natürlich zum Zeitpunkt $t_1=0,000035$ s nicht die gesamte Last auf der Schneide, sondern nur ein Bruchteil davon. Somit sind zum Zeitpunkt t_1 nur vier Einzelkräfte auf die Schneide, genauer auf den ersten vier Knoten des ersten Liniensegmentes (Komponente 1). Dazu wurde in AWB ein sogenanntes *CommandFile* erzeugt und dort folgende Befehle eingegeben:

/solu

An dieser Stelle wurden die Einzelkräfte $a_n, b_n, c_n (n = 1 \dots 30)$ nach Tabellen 2, 3 und 4 und deren zugewiesener Variable definiert. Aus Platzgründen wurde hier darauf verzichtet

time,0.0000335

! erster Zeitschritt

```
local,11,0,2.150254644E+000,-2.174201930E+000,-3.045131093E+000,,,55
```

```
! lokales KOS erstellen, KOS rotiert um Y (lokal) um 55°
```

```
csys,11 ! csys > alles auf dieses KOS beziehen
```

```
nselect,all
```

```
F,43136,FX,a29 ! radiale Einzelkraft (x-Richtung)
```

```
F,43136,FY,c29 ! axiale Einzelkraft (y-Richtung)
```

```
F,43136,FZ,b29 ! tangentielle Einzelkraft (z-Richtung)
```

```
allsel
```

```
local,212,0,2.338152822E+000,-2.242007211E+000,-3.245463844E+000,,,53.93
```

```
csys,12
```

```
nselect,all
```

```
F,194936,FX,a30
```

```
F,194936,FY,c30
```

```
F,194936,FZ,b30
```

```
solve
```

Das war der erste Zeitschritt. Da allerdings eine Bewegung simuliert werden soll, werden mehrere Zeitschritte nötig sein, um die Kraft über drei Schneiden wandern zu lassen. In diesem Fall sind das achtundzwanzig Zeitschritte. Man könnte auch mehr Schneiden wählen, aufgrund des Aufwandes wurde allerdings ein vereinfachtes Modell mit drei Schneiden gewählt. Auch hinsichtlich des Lastübergangs ist es sinnvoll, mehr als zwei Schneiden zu verwenden, da am Anfang ja nur eine Schneide im Eingriff ist, somit nur der Eintritt der Schneide in das zu zerspanende Werkstück simuliert wird. Ab dem Übergang von Schneide 1 auf Schneide 2 bis hin zum Übergang auf Schneide 3 sind die Ergebnisse repräsentativ, da sich der Fräser dann kontinuierlich im Eingriff befindet. An dieser Stelle soll noch einen Nachtrag zu dem „local-Befehl“ kommen. Das erzeugte lokale KOS, die Nummer 11 (Nummerierung für lokale Koordinatensysteme beginnt erst bei der Nummer

11 hat am Ende noch eine Rotationskomponente, welche sich je nach Lage des Knotens um einen gewissen Betrag verdrehen muss, um jeweils die gleiche Orientierung zum Mittelpunkt des Fräsers zu gewährleisten. Den Betrag der Verdrehung wurde wie folgt hergeleitet. Im Fall des z6_d8_48 (1), also sechs Schneiden bei einem Gleichförmigkeitsgrad 1 bedeutet, dass der Eingriffsbereich der zweiten Schneide da beginnt, wo der erste aufhört. Bei sechs Zähnen bedeutet das pro Zahn einen Eingriffsbereich vom 60° , welche ich durch die Anzahl der verwendeten Knoten auf der Schneide teile. Um diesen Betrag ($1,07^\circ$) wird jedes folgende KOS „korrigiert“. Damit ist sichergestellt, dass die Orientierung der Kraft immer auf die Rotationsachse gerichtet ist. Nun soll noch der *zweite Lastschritt* angefügt werden, um die Vorgehensweise zu verdeutlichen.

```
time,0.00007
```

```
fdelete,all          ! Kräfte aus vorherigem Zeitschritt löschen!
```

```
allsel
```

```
local,11,0,2.150254644E+000,-2.174201930E+000,-3.045131093E+000,,,55
```

```
csys,11
```

```
nselect,all
```

```
F,43136,FX,a22      ! definierte Kraftkomponente aus Tabelle 3
```

```
F,43136,FY,c22      ! definierte Kraftkomponente aus Tabelle 4
```

```
F,43136,FZ,b22      ! definierte Kraftkomponente aus Tabelle 5
```

```
allsel
```

```
local, 12,0,2.338152822E+000,-2.242007211E+000,-3.245463844E+000,,,53.93
```

```
csys,12
```

```
nselect,all
```

```
F,194936,FX,a23
```

```
F,194936,FY,c23
```

```
F,194936,FZ,b23
```

allsel

local, 13,0,2.395999376E+000,-2.307188066E+000,-3.202990439E+000,,,52.86

csys,13

nset,all

F,194939,FX,a24

F,194939,FY,c24

F,194939,FZ,b24

allsel

local, 14,0,2.453046452E+000,-2.372473454E+000,-3.159507129E+000,,,51.79

csys,14

nset,all

F,194926,FX,a25

F,194926,FY,c25

F,194926,FZ,b25

allsel

local,15,0,2.509252283E+000,-2.437811417E+000,-3.115052361E+000,,,50.72

csys,15

nset,all

F,194933,FX,a26

F,194933,FY,c26

F,194933,FZ,b26

allsel

local, 16,0,2.564627180E+000,-2.503210719E+000,-3.069623097E+000,,,49.65

csys,16

nselect,all

F,194944,FX,a27

F,194944,FY,c27

F,194944,FZ,b27

allsel

local, 17,0,2.619145881E+000,-2.568639728E+000,-3.023242916E+000,,,48.57

csys,17

nselect,all

F,194948,FX,a28

F,194948,FY,c28

F,194948,FZ,b28

allsel

local,18,0,2.672819884E+000,-2.634112002E+000,-2.975902416E+000,,,47.5

csys,18

nselect,all

F,194960,FX,a29

F,194960,FY,c29

F,194960,FZ,b29

allsel

local, 19,0,2.725614530E+000,-2.699586381E+000,-2.927630395E+000,,,46.43

csys,19

nset,all

F,194953,FX,a30

F,194953,FY,c30

F,194953,FZ,b30

solve !Lösen des Lastschrittes

Die ersten beiden Knotenkoordinaten des zweiten Zeitschrittes sind identisch mit denen des ersten Zeitschrittes. Nur haben sie jetzt andere Kräfte auf den Knoten, da die Last entlang der Schneide „wandert“. Es kommen noch acht Knotenkoordinaten dazu, das sind die folgenden Knoten auf der Schneide. Somit ist die Dreieckslast nun um acht Knoten auf der Schneide gewandert. Auch die Zeitschrittfolge bedarf einer Erklärung, welche nun geliefert wird. Als erstes wird die Umfangsgeschwindigkeit des Fräasers benötigt, diese berechnet sich aus

$$v = 2\pi r u,$$

mit $r=4 \text{ mm}$ und $u = 32000 \text{ min}^{-1}$ ergibt sich eine Umfangsgeschwindigkeit

$$v = 13,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Nun wird der Weg benötigt, den der Fräser im betrachteten Bereich zurücklegt, hier sind das drei Schneiden beziehungsweise der halbe Radius des Fräasers. $s = \frac{U}{2} = \pi r$.

Somit kann nach

$$t = \frac{s}{v} = \frac{\pi \cdot 0,004 \text{ m}}{13,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,001 \text{ s}$$

der Zeitbereich ausgerechnet werden und durch die 28 definierten Zeitschritte dividiert man bekommt ein $\Delta t=0,000035 \text{ s}$, um diesen Betrag wird jeder folgende Zeitschritt vergrößert. Somit entstehen für die Lastwanderung über drei Schneiden 28 Zeitschritte, welche in Tabelle 6 aufgelistet sind.

Tabelle 6: Auflistung der verwendeten Zeitschritte

Zeitschritt	Zeit [s]	Zeitschritt	Zeit [s]
1	0,000035	15	0,000525
2	0,00007	16	0,00056
3	0,000105	17	0,000595
4	0,00014	18	0,00063
5	0,000175	19	0,000665
6	0,00021	20	0,0007
7	0,000245	21	0,000735
8	0,00028	22	0,00077
9	0,000315	23	0,000805
10	0,00035	24	0,00084
11	0,000385	25	0,000875
12	0,00042	26	0,00091
13	0,000455	27	0,000945
14	0,00049	28	0,00098

Die ersten beiden Zeitschritte wurden erläutert, allerdings soll noch ein Kommentar zum Übergang der Last von Schneide 1 auf Schneide 2 bei einem Gleichförmigkeitsgrad $n=1$ folgen. Dies geschieht ab dem Zeitschritt 9 (zu sehen in Abbildung 18 untere gelbe Achse). Zu diesem Zeitpunkt sind nur noch die Einzelkräfte 1 bis 26 auf der Schneide 1, die restlichen Einzelkräfte (27 bis 30) aber schon auf der Schneide 2 auf den ersten 4 Knoten. (siehe blaue Markierung, Abbildung 18). Somit muss beim Erzeugen des *Inputfiles* darauf geachtet werden, dass beim Zeitschritt 9 sowohl die Kraftkomponenten 1 bis 26 auf Schneide 1 sowie auf die Komponenten 27 bis 30 (blaue Markierung Abbildung 18) auf Schneide 2 geschrieben werden. Dies ist bei einem Gleichförmigkeitsgrad $n=1$ relativ überschaubar, bei einem $n=1,5$ (zum Beispiel) allerdings recht aufwendig, da zu den meisten Zeitschritten Kraftkomponenten auf mehreren Schneiden wirken. Aus diesem Grund wurden Excel-Grafiken wie in Abbildung 18 erzeugt, um stets den Überblick zu behalten. Das Gleiche passiert auch beim Übergang von Schneide 2 auf Schneide 3, genauer gesagt bei Zeitschritt 17, da es allerdings analog zu gerade Beschriebenem stattfindet, wird nicht explizit darauf eingegangen. Wenn alle Zeitschritte erfolgreich eingetragen wurden, kann die Analyse starten. Dies geschieht durch einen Klick auf den *Lösung*-Button. Abhängig von der Rechenleistung des Computers kann diese Berechnung zwischen 5 und 8 Stunden dauern.

<div> <div></div> <div>Bewegungsrichtung Last</div> <div></div> </div>	29	22	15	8	1			Schneide 1
	30	23	16	9	2			
		24	17	10	3			
		25	18	11	4			
		26	19	12	5			
		27	20	13	6			
		28	21	14	7			
		29	22	15	8	1		
		30	23	16	9	2		
			24	17	10	3		
			25	18	11	4		Schneide 2
			26	19	12	5		
			27	20	13	6		
			28	21	14	7		
			29	22	15	8	1	
			30	23	16	9	2	
				24	17	10	3	
				25	18	11	4	
				26	19	12	5	
				27	20	13	6	
				28	21	14	7	
				29	22	15	8	
				30	23	16	9	
	7	8	9	10	11	12	13	Zeitschritt

Abbildung 18: Ausschnitt aus der Übersicht der Lastenverteilung auf den Schneiden1 und 2, dargestellt ist nur ein kleiner Bereich beim Lastübergang der Schneiden

6 DISKUSSION DER ART DER LAST

Im folgenden Abschnitt soll die Last, welche beim Fräsen infolge der Spanbildung auf der Scheide entsteht, diskutiert werden. Am Beispiel des GleichlaufräSENS wird diese Lastenentstehung erklärt. Beim GleichlaufräSEN bewegt sich die Schneide im Eingriffsbereich in Richtung der Vorschubbewegung des Werkstückes. Somit wirkt die Schnittkraft auf das Werkstück. Beim GleichlaufumfangsräSEN ist ein spielfreier Tischvorschubantrieb oder ein spielfreier Spindeltrieb notwendig. Beim Eintritt der Schneide in den Werkstoff muss die Schneide den größten Spanquerschnitt h_{\max} abtragen, mit fortlaufender Drehung im zu zerspanenden Material trägt die Schneide dann immer weniger Spanquerschnitt ab bis sie schließlich aus dem Werkstück austritt und die nächste Schneide zum Eingriff kommt. Abbildung 19 (linkes Bild) soll dies noch einmal veranschaulichen.

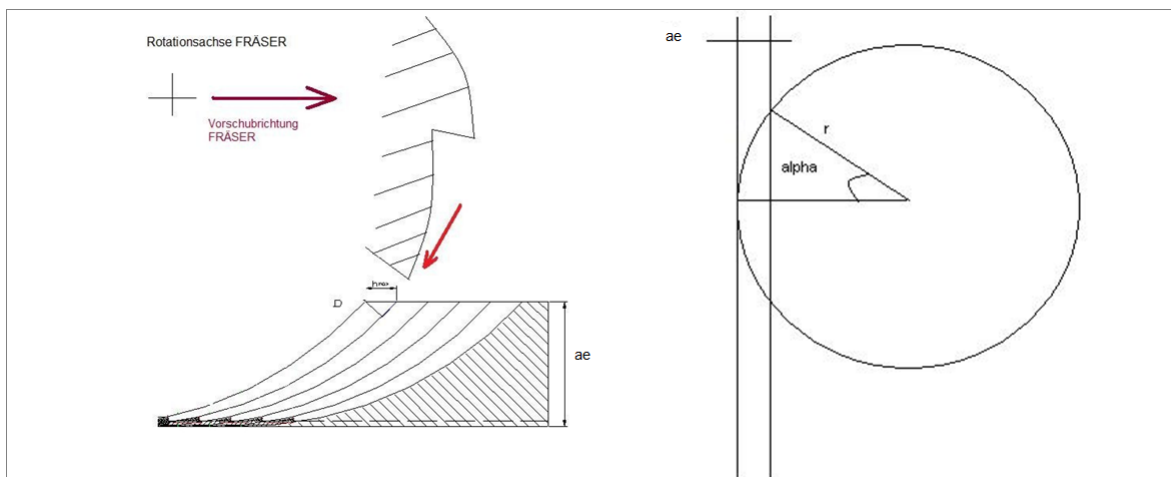


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Spanbildung infolge GleichlaufräSENS

Wenn man sich nun den abgetragenen Span gedanklich vor sich legt, entsteht ein sinusförmiger Verlauf, der abhängig von dem definierten Eingriffsbereich a_e einen bestimmten Eingriffswinkel α für den FräSER definiert. Dies ist in Abbildung 19 (rechts) verdeutlicht. Der Eingriffswinkel α lässt sich wie folgt berechnen:

$$\alpha = \cos\left(\frac{r - a_e}{r}\right)$$

mit $r=4\text{ mm}$ und $a_e=0,2\text{ mm}$ ergibt sich ein

$$\alpha = \arccos\frac{3,8\text{mm}}{4\text{mm}} = 18,2^\circ.$$

Damit ist der Bereich, in dem die sinusförmige Last auftritt, definiert $[0^\circ \dots 18.2^\circ]$. Nun wird der Anstieg der Sinusfunktion in diesem Bereich untersucht, dabei wird eine normale Sinusfunktion

$$f(x) = \sin(x)$$

herangezogen, diese einmal abgeleitet

$$f'(x) = \cos(x)$$

und dann im Bereich von $[0^\circ \dots 18^\circ]$ untersucht. Im Intervall von 0° bis 18° wurden die Anstiege $m_{(0^\circ)} = \cos(0^\circ) = 1$ bis hin zum Anstieg $m_{(18^\circ)} = \cos(18^\circ) = 0,96$ in konstanten Abständen untersucht. Tabelle 7 hat die Ergebnisse aufgelistet:

Tabelle 7: Anstiegswerte im Intervall $[0^\circ \dots 18^\circ]$

Bereich	Anstieg	Bereich	Anstieg
0	1	10	0,988
1	0,999	11	0,985
2	0,999	12	0,982
3	0,999	13	0,980
4	0,998	14	0,976
5	0,997	15	0,972
6	0,996	16	0,969
7	0,994	17	0,965
8	0,992	18	0,960
9	0,990		

Da diese Werte kaum Änderungen zeigten, also immer in der Nähe des Anstieges $m=1$ lagen, (für eine normale Sinusfunktion ein Anstieg von 45°) wurde die Schlussfolgerung gezogen, anstatt dem sinusförmigen Verlauf für die Spannungsanalyse eine Dreieckslast zu verwenden, da im Eingriffsbereich, in dem gearbeitet wird, dies als völlig ausreichend anzusehen ist. Wie im konkreten Fall die Dreieckslasten definiert wurden, ist ausführlich im Kapitel FEM-Modellierung beschrieben.

7 MODALANALYSE

7.1 VOREINSTELLUNGEN

Um das dynamische Verhalten von schwingfähigen Systemen zu verstehen, sollte man vorab eine Modalanalyse durchführen. Diese kann neben den Eigenfrequenzen auch deren Eigenschwingformen darstellen und so das dynamische Verhalten beschreiben. Die

Eigenfrequenz w lässt sich wie folgt berechnen: $w = \sqrt{\frac{c}{m}}$ (für ungedämpftes System mit c ...Federkonstante, m ...Masse). Diese Modalanalyse wurde mit Ansys Workbench 12.1 durchgeführt und nun werden die Ergebnisse für den Fräser (1) dargestellt. Vorab aber eine Erläuterung der Einstellungen, die vorgenommen wurden, um die Analyse zu starten.

PREPROCESSOR

Im Preprocessor werden die folgenden Einstellungen definiert. Als erstes erfolgt der Import des bereits in SolidWorks 2007 erstellten CAD-Modelles über die Schnittstelle, die SolidWorks anbietet. Damit ist ein sicheres und gutes Importieren gewährleistet. In der Strukturmechanik wird nun eine Modalanalyse gewählt und in der *Engineering Data* die relevanten Materialparameter eingegeben. In Tabelle 8 sind diese aufgelistet.

Tabelle 8: Parameter, welche für die Modalanalyse verwendet wurden

Dichte	3,6 g/cm ³
Druckfestigkeit	3000 MPa
Biegefestigkeit	900 Mpa
Elastizitätsmodul	340 Gpa
Poisonzahl	0,25
Umgebungstemperatur	22°C

Nun wird das Netz generiert. Es wurde eine Automatische Netzgenerierung mit standardisierter Elementgröße gewählt, da dies für eine Modalanalyse völlig ausreichend ist, da nur eine quantitative Anschauung der Eigenformen angestrebt wird. Nachdem das Netz erstellt wurde, hat das Modell 8864 Knoten und 4397 Elemente [Elementtyp Solid 186 (et,1,186)]. Nun müssen Anfangsbedingungen definiert werden. In diesem Fall nur eine, die Einspannung des Fräasers (Abbildung 20). Es wurde eine *Fixierte Lagerung* gewählt, dabei nur die Mantelfläche des zylindrischen Körpers ausgewählt und die Einspannung ist somit voll definiert. Aus diesem Grund wurde das importierte CAD-Modell

vorab in SolidWorks in einer Baugruppe erstellt, diese besteht aus zwei Teilen. Das zweite Teil hat die Länge der Einspannung (30mm), somit ist in Ansys Workbench die Flächenselektierung für die Einspannung problemlos möglich. Ein Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass ein Kontaktbereich zwischen den beiden Objekten definiert werden muss, dies ist allerdings in Ansys Workbench kein Problem, da der Kontaktbereich automatisch generiert wird. Die zylindrisch radiale Einspannung (*Fixierte Lagerung*) wie im Realen mit der Werkszugaufnahme der Spindel ist damit nachgebildet. In den *Analyseereinstellungen* kann die Anzahl der benötigten Moden , also die Eigenfrequenzen mit ihren dazugehörigen Eigenschwingformen ausgewählt werden. Für die Ausgabe der ersten sechs Eigenfrequenzen und dazugehöriger sechs Eigenschwingformen werden nun die Ergebnisse dargestellt und kommentiert.

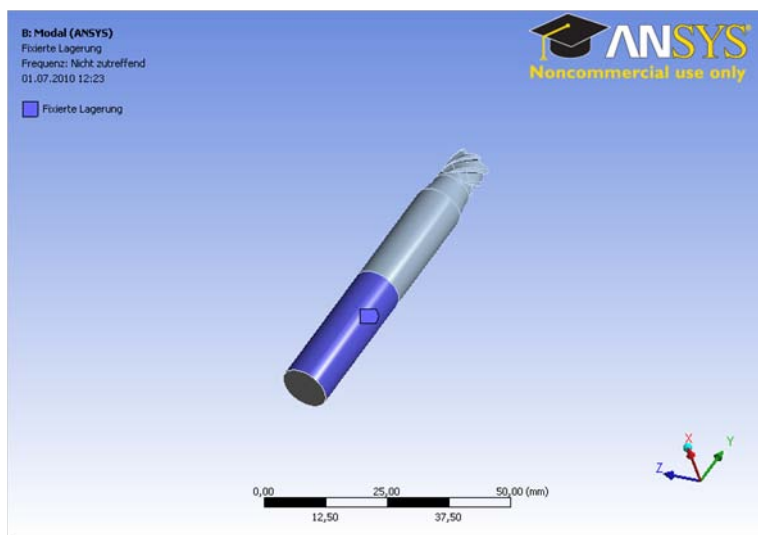


Abbildung 20: Einspannungsbereich bei der Modalanalyse

SOLUTION

Hier kann die Rechnung gestartet werden und nach ca. einer Minute hat Ansys Workbench dies abgeschlossen.

POSTPROCESSOR

Die von Ansys generierten Ergebnisse wurden mittels einer MS-Excel-Diagrammes dargestellt. Sie enthält auf der x Achse die Moden 1 bis 6 und auf der y-Achse die Frequenzen in [Hz]. Da jede Eigenfrequenz seine eigene Eigenschwingform hat, werde ich diese in den folgenden Abbildungen darstellen. Die Angaben der Verformungsergebnisse sind nicht repräsentativ, um diese anzuzeigen, müsste eine Harmonische Analyse durchgeführt werden. Zur qualitativen Veranschaulichung der Eigenschwingformen ist die Modalanalyse ausreichend.

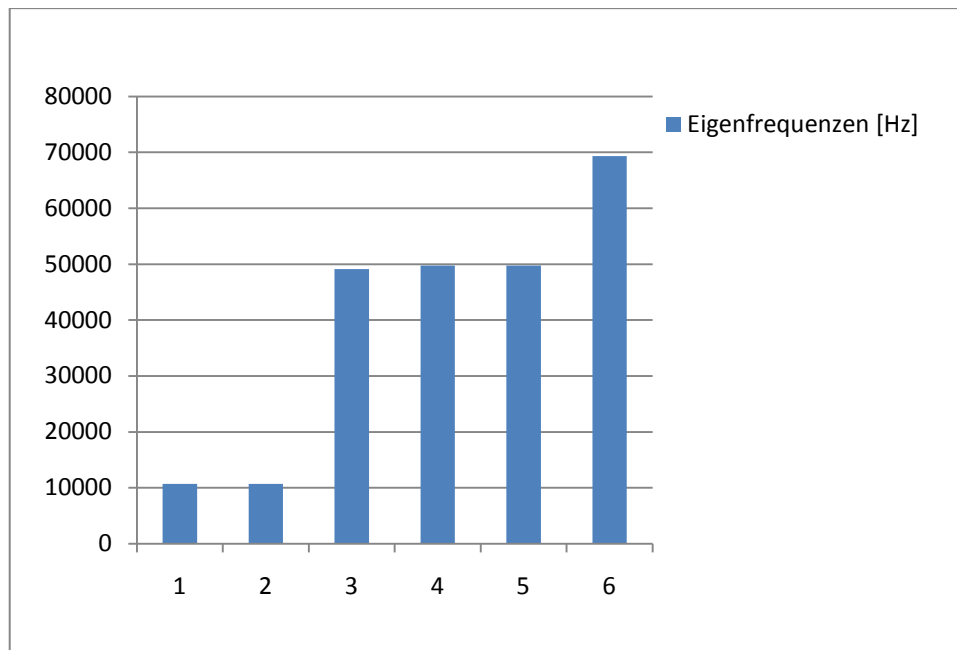


Abbildung 21: Darstellung Eigenfrequenzen

7.2 DIE EIGENFORMEN

Da jede Eigenfrequenz seine eigene Eigenschwingform hat, werden diese Eigenschwingformen in den folgenden Abbildungen dargestellt. Zur qualitativen Veranschaulichung der Eigenschwingformen ist die Modalanalyse ausreichend. Die erste Eigenfrequenz bringt die in Abbildung 22 zu sehende Eigenschwingform hervor. Diese ist charakterisiert durch eine einfache Biegung, sozusagen ein einfacher Schwingungsbogen. Bei deren Animation würde dieser Fräser nur in einer Ebene wie ein Pendel schwingen und einen einfachen Schwingungsbogen darstellen. Abbildung 23 weist ebenfalls die Schwingform auf, doch die Orientierung der Schwingung ist diesmal um 90° gedreht. Bei der Analyse der Eigenfrequenzen (EF) ist es vorteilhaft, wenn diese hohe Frequenzen erreichen. Ein höhere EF ist sinnvoll, denn umso höher diese ist, je starrer ist der Fräser und je unwahrscheinlicher ist der Resonanzfall, da Erregerfrequenzen dann ebenfalls sehr hoch sein müssten. Die 3. Eigenform der 3. Eigenfrequenz beinhaltet die erste Torsionsschwingung. Dabei schwingt der Fräser mit einfacher Torsion. Die Torsionsachse ist die axiale Rotationsachse des Fräasers. Die 4. Eigenform stellt wieder eine Biegung dar, diesmal allerdings mit einem Drehpunkt (Schwingungsbogen), zu sehen in Abbildung 25. Die Schwingebene ist dieselbe wie die der 1. Eigenfrequenz. Eigenform 5 (Abbildung 26) ist vom selben Charakter wie EF 4, allerdings in Schwingungsausrichtung wie EF 2. Die 6. Eigenform (Abbildung 27) ist die erste Schwingung in Zug-Druckrichtung der

Fräserachse. Der Fräser wird in seiner Form sozusagen gestaucht beziehungsweise gedehnt.

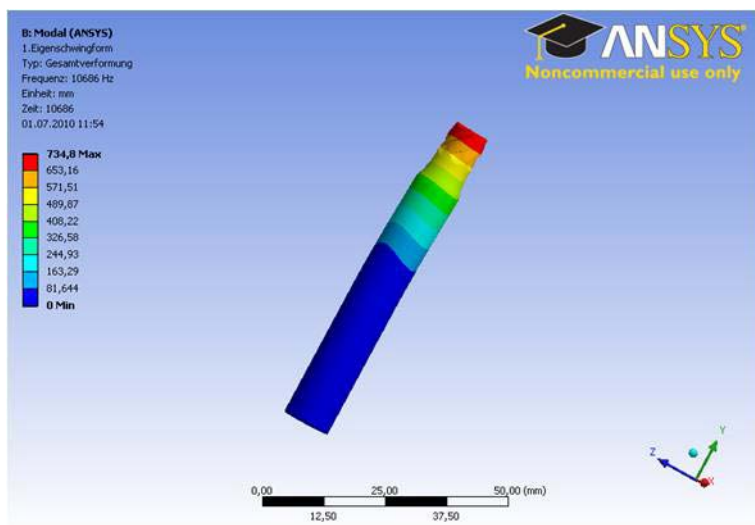


Abbildung 22: Darstellung der 1. Eigenform

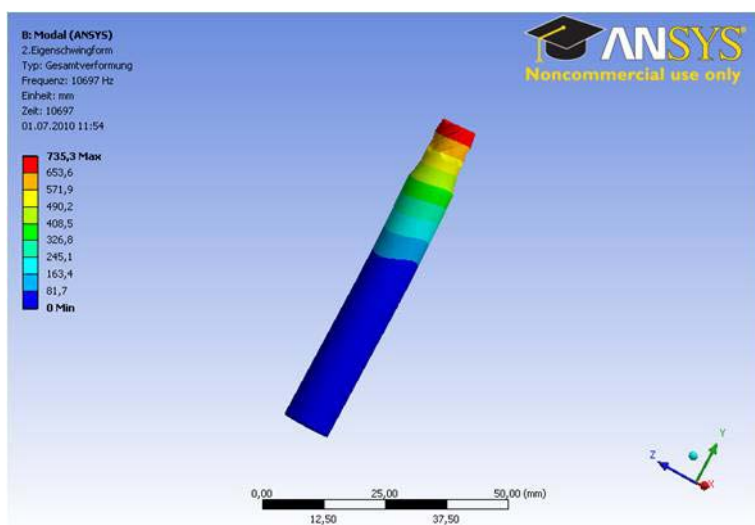


Abbildung 23: Darstellung der 2. Eigenform

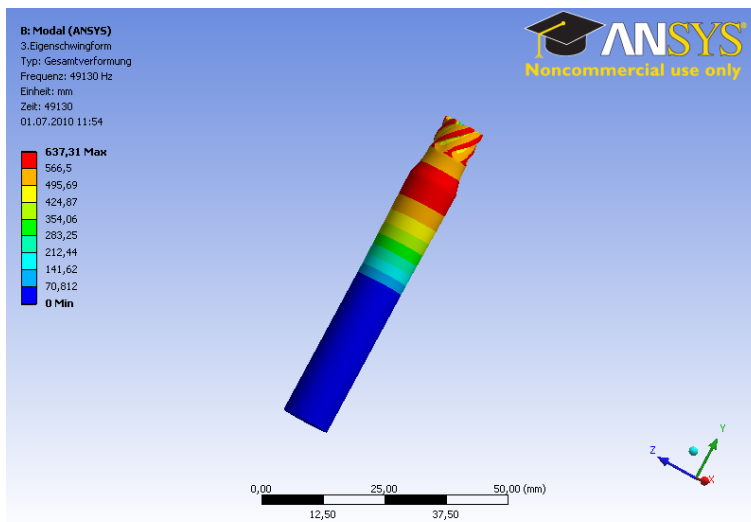


Abbildung 24: Darstellung der 3. Eigenform

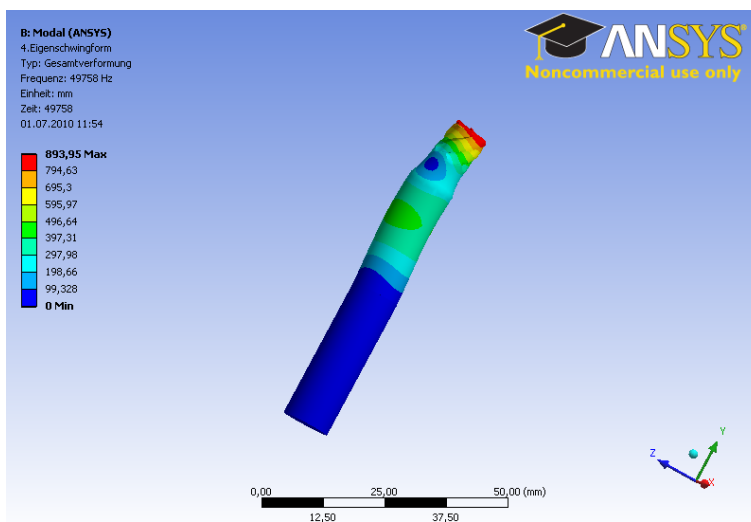


Abbildung 25: Darstellung der 4. Eigenform

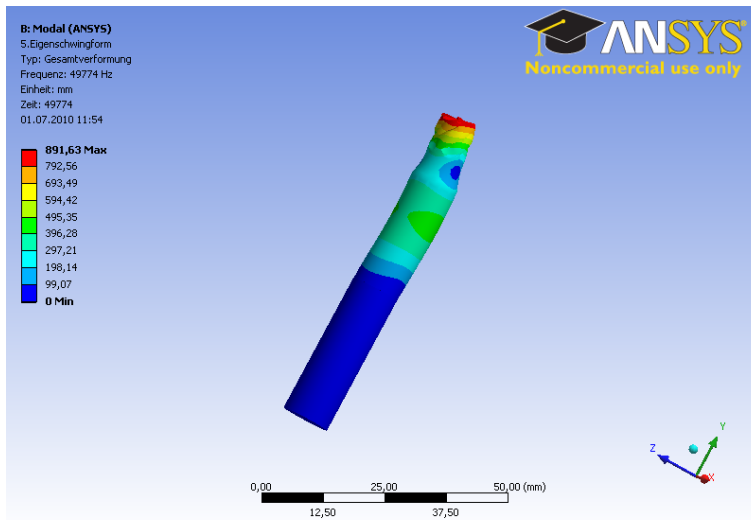


Abbildung 26: Darstellung der 5. Eigenform

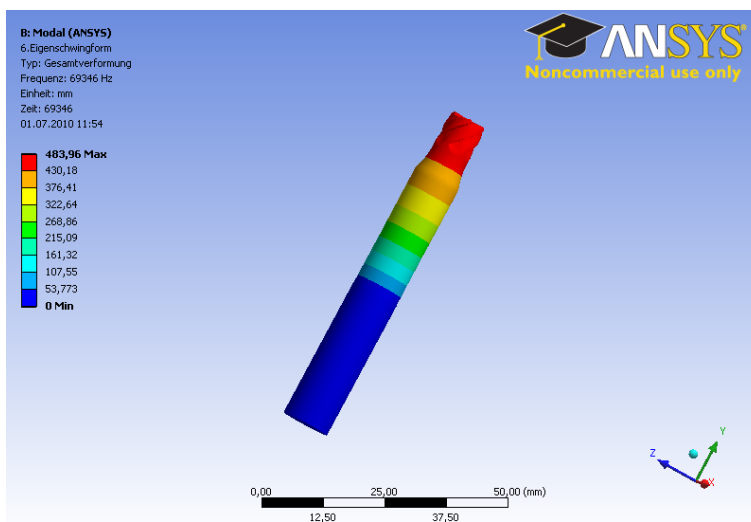


Abbildung 27: Darstellung der 6. Eigenform

Nach der grafischen Darstellung der Eigenformen werden nun einmal rein theoretisch die ersten drei Eigenfrequenzen bestimmt, um ein Gefühl dafür zu bekommen, in welchen Größenordnungen es eventuell Abweichungen geben könnte.

7.3 RECHNERISCHE ERMITTLUNG DER EIGENFREQUENZEN

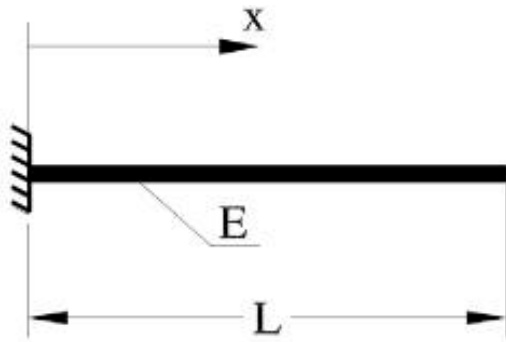


Abbildung 28: vereinfachtes Modell für Eigenfrequenzberechnung

Gegeben:

Modell nach Abbildung 28

$$E = 340000 \frac{N}{mm^2}, \rho = 3400 \frac{kg}{m^3}, L = 40mm$$

kreisförmiger Querschnitt $r = 4mm$

Lösung

Allgemeine DGL der Balkenschwingung

$$-(EI_y w'')'' + (\rho I_y \ddot{w}')' + (Nw)'' + q_z = \rho A \ddot{w}$$

1. Term : Biegung (elastisch)

2. Term: rotatorische Trägheit

3. Term: Normalkraft

4. Term: eingeprägte Querkraft

Vereinfachung der Balkenschwingung

$N = 0$, keine Normalkräfte

rotatorische Trägheit vernachlässigt

$$-(EI_y w'')'' + q_z = \rho A \ddot{w}$$

Da es sich um eine freie Schwingung handelt, ist $q_z = 0$ und $EI_y = \text{const.}$, daraus ergibt sich

$$-EI_y w'''' = \rho A \ddot{w}$$

Nun kann die DGL gelöst werden.

$$w(x, t) = \hat{w}(x)T(t)$$

$$w'''' = \hat{w}''''T$$

$$\ddot{w} = \hat{w}\ddot{T}$$

Einsetzen

$$-\frac{EI_y}{\rho A} \frac{\hat{w}''''}{\hat{w}} = \frac{\ddot{T}}{T} = -w_j^2$$

Differentialgleichung zweiter Ordnung nach dem *Ort*:

$$\hat{w}'''' + \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^4 \hat{w} = 0, \quad \lambda_j^4 = \frac{\rho A}{EI_y} w_j^2 L^4$$

Differentialgleichung zweiter Ordnung nach der *Zeit*:

$$\ddot{T} + w_j^2 T = 0$$

Lösungsansatz:

$$\hat{w}(x) = c e^{\beta x}$$

In die DGL einsetzen

$$\beta^4 - \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^4 = 0$$

Daraus folgt nach **Euler**

$$\hat{w}(x, t) = C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)$$

In die Formel der Gesamtauslenkung eingesetzt ergibt sich damit:

$$\hat{w}(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \left[C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) \right] [A_j \cos(w_j t) + B_j \sin(w_j t)]$$

Nun können aus den **Randbedingungen** die Eigenformen bestimmt werden:

$$w(0, t) = 0$$

$$\alpha = w'(0, t) = 0$$

$$M(L, t) = -EI_y w''(L, t) = 0$$

$$Q(L, t) = -EI_y w'''(L, t) = 0$$

Nun werden die **Ableitungen** benötigt:

$$\hat{w}(x, t) = C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)$$

$$\hat{w}'(x, t) = \left(\frac{\lambda_j}{L}\right) [-C_{1j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)]$$

$$\hat{w}''(x, t) = \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^2 [-C_{1j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)]$$

$$\hat{w}'''(x, t) = \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^3 [C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)]$$

Nach einsetzen der **Randbedingungen** folgt:

$$w(0, t) = \sum_{j=1}^{\infty} T_j [C_{2j} + C_{4j}] \rightarrow C_{1j} = -C_{3j}$$

$$w'(0, t) = \sum_{j=1}^{\infty} T_j \left(\frac{\lambda_j}{L}\right) [C_{2j} + C_{4j}] \rightarrow C_{2j} = -C_{4j}$$

$$w''(L, t) = 0 = \sum_{j=1}^{\infty} T_j \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^2 [-C_{1j}(\cosh \lambda_j) + \cos(\lambda_j)] - C_{2j}(\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j))$$

$$w'''(L, t) = 0 = \sum_{j=1}^{\infty} T_j \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^3 [-C_{1j}(-\sinh \lambda_j) + \sin(\lambda_j)] - C_{2j}(\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j))$$

Im Matrixschreibweise ergibt das:

$$\begin{pmatrix} -[\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)] & -[\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j)] \\ -\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j) & -[\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{1j} \\ C_{2j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Daraus folgt die triviale Lösung

$$C_{1j} = C_{2j} = 0$$

und die nicht triviale Lösung

$$[\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)]^2 + \sin^2(\lambda_j) = 0$$

$$\cos(\lambda_j) \cosh(\lambda_j) + 1 = 0$$

Nun können die Wellenzahlen ermittelt werden

$$\lambda_1 = 1,875$$

$$\lambda_2 = 4,694$$

$$\lambda_3 = 7,855$$

Und daraus die Eigenfrequenzen

$$w_j^2 = \frac{\lambda_j^4 E I_y}{L^4 \rho A}$$

$$f_j = \frac{w_j}{2\pi}$$

Mit

$$I_y = \frac{\pi d^4}{64} = 201,06 \text{ mm}^4 \text{ und } d = 8 \text{ mm}$$

lauten die ersten drei **Eigenfrequenzen**

$$f_1 = 6976,7 \text{ Hz} \quad (\text{Eigenfrequenz der Biegung})$$

$$f_2 = 43834 \text{ Hz} \quad (\text{Eigenfrequenz der Torsion})$$

$$f_3 = 122750 \text{ Hz} \quad (\text{Eigenfrequenz von Zug-Druck})$$

7.4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Beim Vergleich der rechnerisch ermittelten Eigenfrequenzen mit denen der Simulation aus Ansys Workbench stimmen nur bedingt überein. Die Abweichung beträgt zwischen 10% und 30 %. Das kann mehrere Gründe haben. Zum einen ist ein sehr kritischer Punkt die Einspannungsvariante bei Ansys. Mit einer *Fixierten Lagerung* werden andere Ergebnisse

erzielt als mit einer *Zylindrischen Lagerung*. Die verwendete Einspannung ist die Fixierte Lagerung. Dann könnte eventuell die automatische (grobe) Vernetzung eine Problemfaktor darstellen.

8 SPANNUNGSVERGLEICH DER FRÄSERGEOMETRIEN

Dieser Vergleich soll sich vor allem mit der qualitativen Bewertung der Zug- und Druckspannungen beschäftigen, da diese bei dem verwendeten Werkstoff SiAlON sowie anderen Keramiken eine bedeutende Rolle hinsichtlich Bauteilfestigkeit spielen. Deshalb wurde bei der transienten Analyse nicht die übliche Vergleichsspannung von Mises (GEH) verwendet, da diese keine konkrete Aussage über auftretende Zug- und Druckspannungen geben kann. Sie ist ein künstlich erzeugter einachsiger Spannungszustand, der die Materialbeanspruchung eines mehrachsigen Spannungszustandes darstellt, um diese mit den Werten des Zugversuches vergleichen zu können und Bauteilfestigkeiten abzuleiten. In ihr fließen die Normalspannungen sowie Torsionsspannungen in einer Formel zusammen und können damit keine Aussagen zu lokalen Zug- und Druckspannungszonen geben. Außerdem ist diese Gestaltänderungshypothese für spröde Werkstoffe wie die Keramik ungeeignet.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Vergleich der Spannungsergebnisse aus den transienten Berechnungen der in Kapitel 3 aufgeführten Fräsergeometrien z6_d8_48 **(1)**, z6_d8_58 **(2)** und z8_d8_50 **(3)**. Zuerst werden die beiden Sechsschneider (1) und (2) miteinander verglichen und danach (1) mit (3), da diese Fräser ähnliche Drallwinkel besitzen, sich jedoch in der Anzahl der Zähne/Schneiden unterscheiden.

8.1 VERGLEICH DER SECHSSCHNEIDER

Bevor es zum Vergleich der Sechsschneider kommt, hier noch einmal kurz die Unterschiede und Gemeinsamkeiten. Beide Analysen wurden für eine Schnitttiefe $a_p=4$ mm und eine Zustellung $a_e=0,2$ mm durchgeführt. Beide haben sechs Schneiden. Der offensichtlichste Unterschied der beiden Fräsergeometrien ist der Drallwinkel β , und der daraus resultierende Gleichförmigkeitsgrad n , der Aussage darüber gibt, wie viele Schneiden sich im Eingriff befinden. Der Gleichförmigkeitsgrad $n=1$ für den z6_d8_48 (1) sagt aus, dass jeweils nur eine Schneide im Eingriff ist, ein höherer Drallwinkel β beim z6_d8_58 bei gleicher Zähnezahl führt hingegen dazu, dass mehr als eine Schneide im Eingriff ist. Welche geometrische Variante die günstigere für den Zerspanprozess ist, wird im Folgenden diskutiert.

Als erstes wurden die beiden Diagramme der mittleren Zug- und Druckspannungen über dem definierten Zeitbereich verglichen. Dabei wurde die Ausgabe der mittleren Spannungen gewählt. In Abbildung 29 sind jeweils die Zugspannungen (grüne Kurve) und Druckspannungen (rote Kurve) abgebildet. Die y-Achse charakterisiert die Spannungen

(Zug-positiv, Druck-negativ), die x-Achse die Zeitschrittfolge. Anzumerken ist, dass beide Geometrien den gleichen Zeitbereich haben, in dem die Last über die Schneide wandert, doch der Kontaktbereich unterscheidet sich ($k_{ges(1)}=5,98$ mm, $k_{ges(2)}=7,55$ mm, siehe auch Kapitel FEM-Modellierung „Aufbringen der Kräfte“), daher hat (2) zwei Zeitschritte mehr, da mehr Weg auf der Schneide in der gleichen Zeit zurück gelegt werden muss. Als erstes muss auf Phänomen eingegangen werden, welches

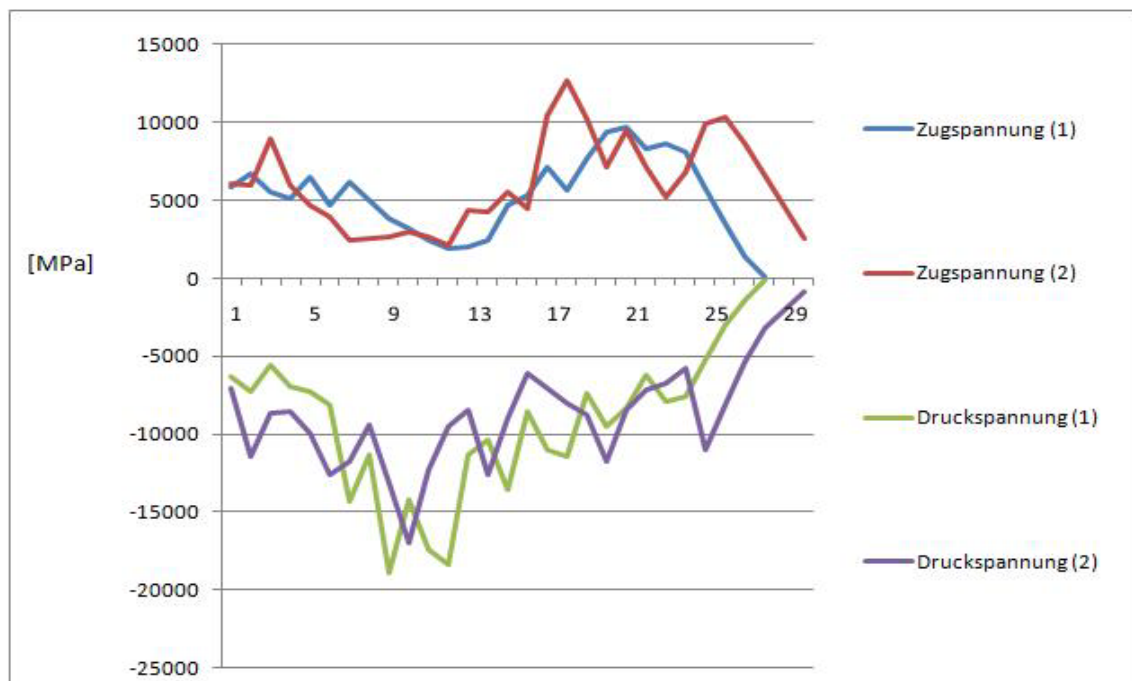


Abbildung 29: Zug- und Druckspannungen von Fräser (1) und Fräser (2)

bei allen Analysen aufgefallen und aufgetreten ist. Es handelt sich um die Zug- und Druckspannungen auf der Schneide während der ersten Zeitschritte. Bei Eintritt der Last auf Schneide 1 sind die Druckspannungen auf der Unterseite, während die Zugspannungen (rote und gelbe Felder in Abbildung 30) auf der Oberseite (Umfangsfläche) der Schneide anzufinden sind. Während des Verlaufes der Kraft über die Schneiden wechseln die Zugspannungs- bzw. Druckspannungsseiten. Dies ist in Abbildung 30 verdeutlicht.

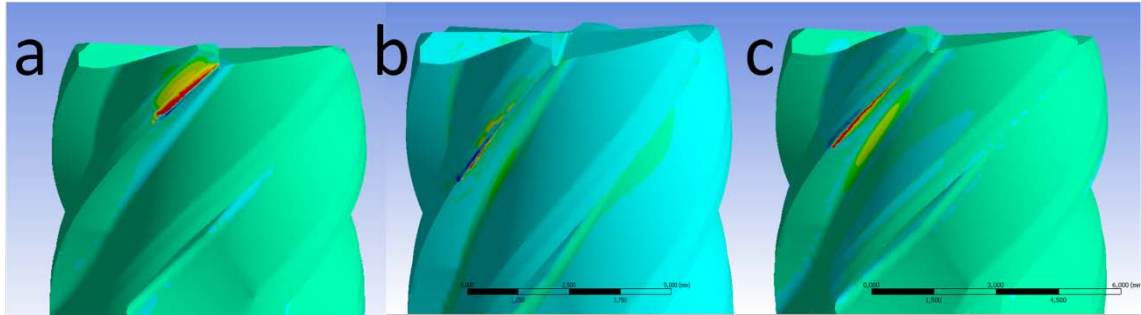


Abbildung 30: Zug- und Druckspannungswechsel auf der Schneide von Fräser (1)

Dargestellt ist a: Schneide 1, Zeitschritt 4, Zugspannung auf Umfangsfreifläche, Druckspannung auf Unterseite der Schneide; b: Schneide 2, Zugspannung auf beiden Schneidenseiten; c: Schneide 3, Zeitschritt 22, Zugspannung auf Unterseite der Schneide, Druckspannungen auf Umfangsfreifläche

Eine mögliche Erklärung könnte die erstmalige Verformung infolge der auftretenden Last auf die Schneide1 sein. Auch ein Fehler in der Implementierung der Kräfte auf die Schneide ist prinzipiell möglich, doch nach mehrfacher Kontrolle, auch der jeweiligen Rotationskorrekturen der lokalen Koordinatensysteme, wird dies als Grund an dieser Stelle ausgeschlossen. Hier folgt jetzt ein Interpretationsansatz über die Verformung (Abbildung 31).

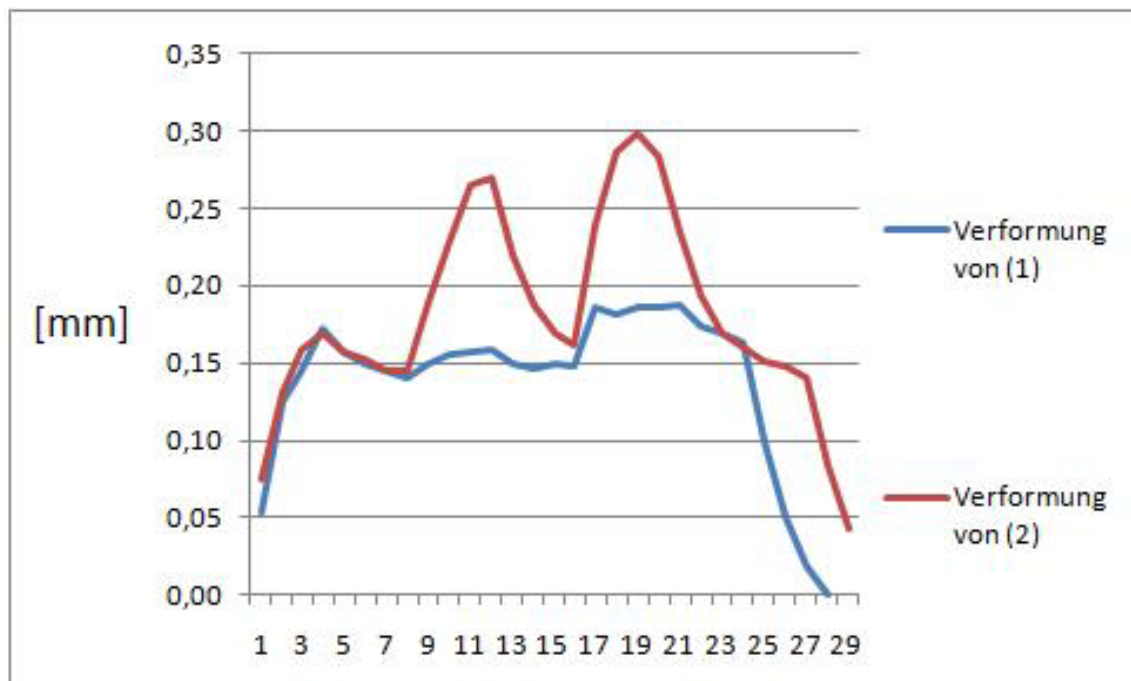


Abbildung 31: Vergleich der Verformungen von Fräser (1) und Fräser (2)

Beim erstmaligen Eintritt der Last auf der Schneide und dem Wandern dieser Last über die Schneide1 verformt sich der Fräser aus der Nulllage (keine Verformung) bis zu seinem Maximum [0,17242mm -> laut Tabelle „Gesamtverformung(1)“] bei Zeitschritt 4. Sein Maximum hat er erreicht, wenn die komplette Last auf der Schneide ist. Mit

fortlaufendem Zeitschritt wandert die Last in Richtung Einspannung, somit verändert sich der Hebelarm und die Verformung verringert sich. Dies kann in Abbildung 31 beim Zeitschritt 5 bis 9 beobachtet werden, ab dem zehnten Zeitschritt steigt die Verformung wieder, da die Last auf der Schneide 2 auftaucht. Der unmittelbare Vergleich im Hinblick auf die Verformung entscheidet der Fräser (1) für sich, was daran liegt, dass immer nur eine Last auf der Schneide ist, welche die Verformung hervorruft. Beim Fräser (2) sind in bestimmten Momenten zwei Schneiden mit Lasten versehen, was natürlich eine größere Auslenkung/Verformung zur Folge hat. Den Maximalwert zum Vergleich mit Fräser (1) liegt bei 0,29873 mm.

An dieser Stelle soll eine Überprüfung der maximalen Verformungswerte vorgenommen werden. Dafür wird das vereinfachte Modell (Abbildung 32) eines mit der Länge $L=40\text{mm}$ eingespannten kreisförmigen Stabes mit dem Durchmesser D (8mm) und dem E-Modul ($340.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$), bei dem eine Kraft $F=1000\text{N}$ am äußersten Ende (maximale Verformung) angreift, herangezogen.

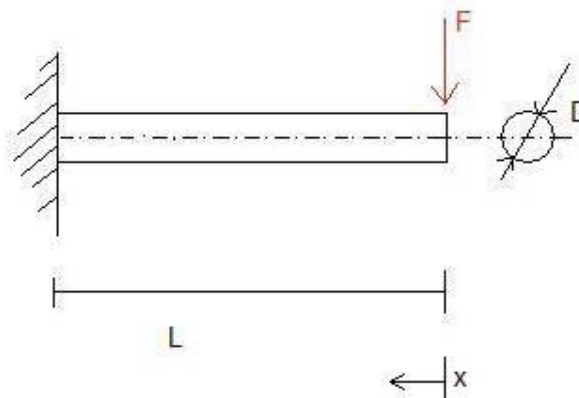


Abbildung 32: Verdeutlichungsskizze der rechnerischen Ermittlung der Verformung

Die Formel der Verformung w lautet allgemein

$$w = \frac{F L^3}{3 E I_y}.$$

Dabei ist

$$I_y = \frac{\pi D^4}{64} = 201 \text{mm}^4.$$

Daraus folgt die Verformung

$$w(x=0) = \frac{1000 \text{ N} \cdot 40 \text{mm}^3}{3 \cdot 340000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 201 \text{mm}^4} = 0,312 \text{mm}.$$

Aufgrund der getroffenen Verallgemeinerung der Tatsache, dass die Kraft eine Punktlast ist, welche am Ende des Stabes wirkt, ist die berechnete Verformung repräsentativ im Bezug auf die von Ansys ermittelten Werte.

Allerdings klärt das noch nicht die vertauschten Spannungslokalisationen auf der Schneide. Erst mit dem Eintritt in Schneide 2 kann man von dem eigentlichen kontinuierlichen Zerspanprozess sprechen, da ab jetzt das Fortlaufen der Last von Schneide zu Schneide und somit einen kontinuierlichen Zerspanen simuliert wird. Warum vorher dieser Spannungswechsel zu beobachten ist, ist sehr schwer zu erfassen. Es wurde vermutet, dass beim erstmaligen Lasteintritt sehr komplexe Spannungszustände im Fräser herrschen, die Vermutung stützt sich auf der Kontrolle der Schubspannungen, da auch diese vor allem im Anfangsbereich starke Schwankungen und Spannungsspitzen zu verzeichnen haben.

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse aus der transienten Analyse für die Schubspannungen der beiden Fräsergeometrien. Schubspannungen, also Spannungen, die infolge Schub oder Torsion entstehen [H1], sollten hier keinesfalls unbeachtet bleiben, denn gerade beim Fräser, wo Kräfte nicht im Mittelpunkt angreifen, entstehen zum Teil hohe Schub- und Torsionsspannungen, vor allem beim ersten Eintritt der Last auf die Schneide, denn der Fräser „reagiert“ aus einem unverformten und unverdrehten Zustand. Dies erklärt die anfänglichen Spannungsspitzen in Abbildung 33.

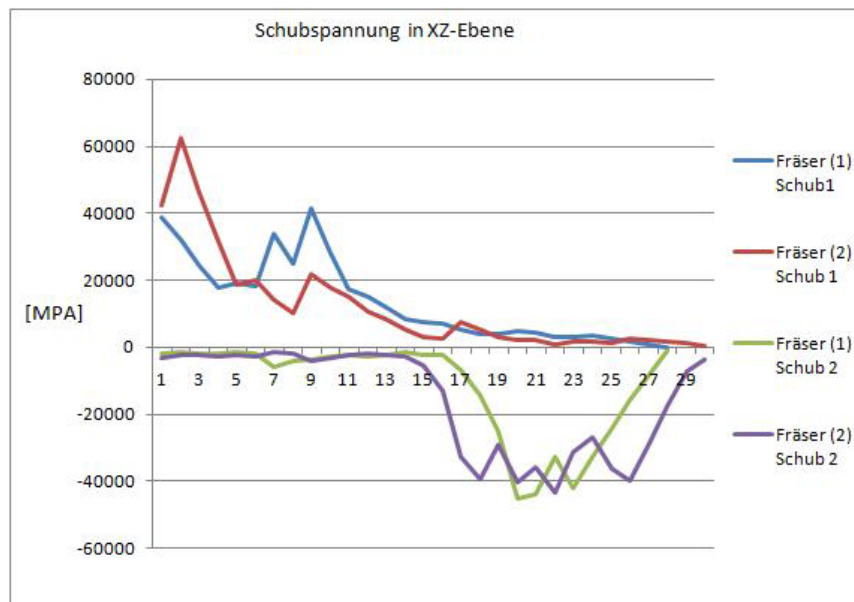


Abbildung 33: Schubspannung in xZ-Ebene

Besonders die Schubspannungen in der xz-Ebene werden gesondert betrachtet, da diese eine große Relevanz über das am Anfang besprochene Phänomen der Laständerung auf der Schneide haben könnte. Die xz-Ebene des Fräasers ist die Ebene, die den Fräser

gedanklich längs der Hauptrotationsachse in Scheiben schneiden würde. Diese Schubspannung, vor allem hervorgerufen durch die radialen sowie tangentialen Kräfte, versetzt den Fräser bei erstmaligem Eintritt der Kraftkomponenten unter Torsion und damit auch unter Schubbelastung. Diese Schubspannung, zusehen in

Abbildung 33, zeigen vor allem in den ersten Zeitschritten, beim Fräser (1) von Zeitschritt 1 bis Zeitschritt 13 hohe Schubspannungen. Der Lastwechsel in vollzieht sich ab Lastschritt 13, daher soll eine Parallele dazu gezogen werden. Bei erstmaligem Eintritt der Kraft erfährt die Schneide1 eine hohe Verformung aus der Ruhelage und somit auch hohe Schubspannungen. Diese Schubspannungen verringern sich erst ab Zeitschritt 13 wieder, also wenn die Verformung der ersten Schneide vorüber ist und sich eine Verformung, resultierend aus der Verformung der ersten Schneide mit der Verformung der zweiten Schneide, einstellt. Zu diesem Zeitpunkt kommt es nicht mehr zu einer spontanen Verformung aus der Nulllage, vielmehr wird die Verformung mehr oder weniger beibehalten. An dieser Stelle folgt eine Vermutung: Der Effekt, also der Ersteintritt der Last könnte auf den Fräser eine Art Ruckverhalten ausüben, denn der *Ruck*, definiert durch die erste Ableitung der Beschleunigung beziehungsweise zweite Ableitung der Geschwindigkeit bewirkt im Fräser eine Lastwechselreaktion. Mathematisch ist der Ruck j durch die Formel

$$j(t) = \dot{a}(t) = \ddot{v}(t) = \frac{d^3 \ddot{x}(t)}{dt^3} \left[\frac{m}{s^3} \right]$$

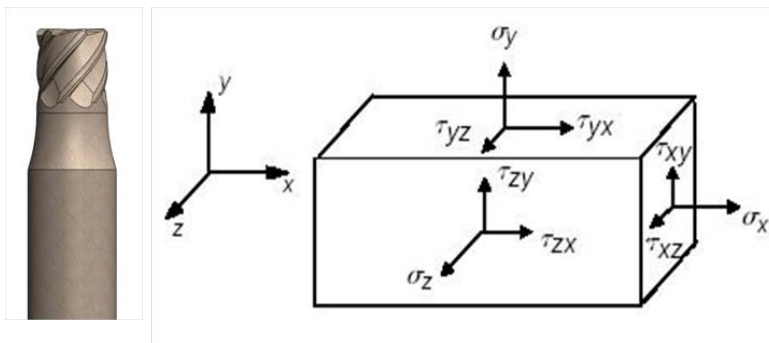


Abbildung 34: Darstellung Schubspannungen

definiert. Hier soll noch ein zweiter Ansatz dargelegt werden. Dieser bezieht sich auf die Schubspannungen in der XZ-Ebene. Die Schubspannungen in der XZ-Ebene infolge der Hauptspannung σ_y besteht aus den zwei Schubspannungen T_{yx} und T_{yz} . Welche Schubspannung in Abbildung 34 welcher Schubspannung in Ansys entspricht, ist leider durch die in Ansys ausgewerteten Ergebnisse nicht eindeutig zu klären. Die Vermutung geht dahin, dass T_{yx} Schub1 und T_{yz} Schub2 charakterisiert. Sicher ist allerdings, dass die

Schubspannungen in einem Winkel von 90° zueinander auftreten. Da der Fräser in der Simulation allerdings still steht und die Last „rotiert“, könnte es sein, dass die Schubspannungen (Schub1 und Schub 2 in Abbildung 33) deshalb geringer werden, da durch Rotation der Last die eine Schubspannungsebene verlassen wird und die andere 90° verdrehte Schubspannungsebene beginnt. Falls diese Variante real ist, dürfte man sich nicht mehr auf die hohen Schubspannungen als Hauptgrund der Laständerung auf der Schneide beziehen, denn dann wären die Schubspannungswerte immer gleich groß. Die negativen Werte wären dann nur auf die Orientierung der Schubspannungen bezogen.

Da der Bereich des ersten Lasteintrittes bis zum Umkehren der *Spannungsseiten* ein unstetiger und schwer einzuschätzender Bereich ist, werden die folgenden Betrachtungen auf den kontinuierlichen Bereich begrenzt, konkret von Zeitschritt 14 bis Zeitschritt 24 bei Fräser (2) beziehungsweise Zeitschritt 25 bei Fräser (1). Im gerade besprochenen Bereich liegt der Unterschied zwischen den beiden Mittelspannungskurven in der Streuung der Zugspannungswerte der zweiten Abbildung gegenüber der ersten. In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass Fräser (1) ein relativ ruhigen Anstieg beziehungsweise Abfall der Zugspannungen hat, was darauf schließen lässt, dass ein niedrigerer Drallwinkel geringere Zugspannungsänderungen hervor ruft. Die Spannungswerte verdeutlichen dies nochmals, da in Abbildung 33 eine mittlere Maximalspannung von 9657 MPa des Fräasers (1) gegenüber 12697 MPa des Fräasers (2) auftreten. Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass diese Werte nicht aussagekräftig im Bezug auf Bauteilfestigkeitsgrenzwerte sind (es wurden keine Sicherheitsfaktoren der Bauteilfestigkeit bestimmt), es soll vielmehr den unmittelbaren Unterschied zwischen den beiden Geometrievarianten darstellen. Stark schwankende Zugspannungen stellen eine Art wechselnde Beanspruchung dar, die bei spröden Werkstoffen wie der Keramik nach Möglichkeit vermieden werden sollten, denn keramische Werkstoffe sind vor allem für hohe Druckfestigkeiten bekannt [H2]. Ein Blick auf die herrschenden Druckspannungen (Abbildung 33 rote Kurven) im soeben definierten Zeitbereich sind bei beiden Fräsern schwankend. Doch soll auch hier die Aussage gewagt werden, dass Fräser (1) die geringeren Schwankungen aufweist. Dies ist auf das gleichmäßige Auftreten der Last zurückzuführen. Bei Fräser (1) mit einem $n=1$ ist während des Eingriffes immer nur eine Last auf der Schneide, es kommt also zu keinem weiterem Einwirken von einer Last und damit zu einem ruhigeren Spanungsverlauf, somit ist es ein nahtloser Übergang von Schneide zu Schneide. Bei einem $n=1,52$ bei Fräser (2) ist dies nicht der Fall, da zu bestimmten Zeiten zwei Schneiden gleichzeitig belastet werden und somit zu diesen Zeitintervallen höhere Spannungen erzeugt werden. Ein Blick auf das Verschiebungsdiagramm (Abbildung 31) zeigt eine nahezu doppelte Verformung/

Verschiebung, allerdings keine proportionale Verdopplung der Zug- und Druckspannungen. Da in der *Engineering Data* nur der E-Modul (mit Poissonzahl) in die Berechnung eingeht, könnte dies der Ansatz sein. Der E-Modul ist charakterisiert durch die Spannung σ und die Dehnung ϵ . Da ein sehr hoher E-Modul bei einer (verhältnismäßig) geringen Poissonzahl vorhanden ist, kommt es bei Lasterhöhung zu einer geringen Dehnungserhöhung aufgrund der niedrigen Poissonzahl (geringe Querschnittsänderung). Es ist somit kaum elastische Verformung vorhanden (spröder Werkstoff). Die Druckspannungen, welche ein Resultat der Biegung beziehungsweise einer Krafteinwirkung sind, ähneln sich bei beiden Fräsern. Beide haben während des ganzen Eingriffes Schwankungen, bei Fräser (2) sind die Schwankungen minimal größer, doch kann aus dem Diagramm kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. In

Abbildung 33 kann man die maximalen mittleren Druckspannungen (rote Kurven) vergleichen, Fräser (1) hat ein Maximalwert von 18926 MPa gegenüber 17027 MPa des Fräasers (2). Diese Werte sind allerdings aus dem Bereich, der aufgrund des erstmaligen Lasteintrittes nicht für den Vergleich verwendet wird.

8.2 VERGLEICH DES SECHSSCHNEIDERS (1) MIT DEM ACHTSCHNEIDER (3)

In diesem Vergleich sollen die unterschiedlichen Zähnezahlen, sechs gegenüber acht, bei vergleichbaren Drallwinkeln, 48° bei (1) und 50° bei (3), untersucht werden. Wie beim ersten Vergleich soll damit begonnen werden, die mit Ansys Workbench 12.1 ermittelten mittleren Zug- und Druckspannungen zu vergleichen. Auf den ersten Blick weisen die Druck- und Zugspannungskurven (Abbildung 35) gewisse Ähnlichkeit auf. Im definierten Bereich (Zeitschritt 13 bis 25) bis auf den Extremwert der Zugspannung bei Fräser(3) bei Zeitschritt 18 sind keine auffälligen Unterschiede festzustellen. Doch erst noch ein paar Kommentare zu den Kurven. Fräser (3) mit seinen acht Zähnen müsste der Korrektheit halber mit dem Lasteingriff von vier Schneiden dargestellt sein, da der Zeitbereich auf Fräser (1) mit 3 Schneiden und einer halben Umdrehung abgestimmt wurde. Dann würde der Unterschied im Kurvenverlauf noch deutlicher werden, die Zugspannungskurve (3) würde einen noch gestauchteren Verlauf im Diagramm zeigen. Fräser (3) wurde allerdings nur mit 3 Schneiden simuliert. Dieser Effekt kommt dadurch zustande, da der Fräser (1) bei einer halben Umdrehung 3 Schneiden im Eingriff hat, Fräser (3) allerdings 4 Schneiden. Somit wurde für Fräser (3) der falsche Zeitbereich und damit in der Simulation eine falsche Geschwindigkeit gewählt. Eine spätere Kontrolle mit

Geschwindigkeitskorrektur brachte hinsichtlich des Spannungsverlaufes keine Änderungen.

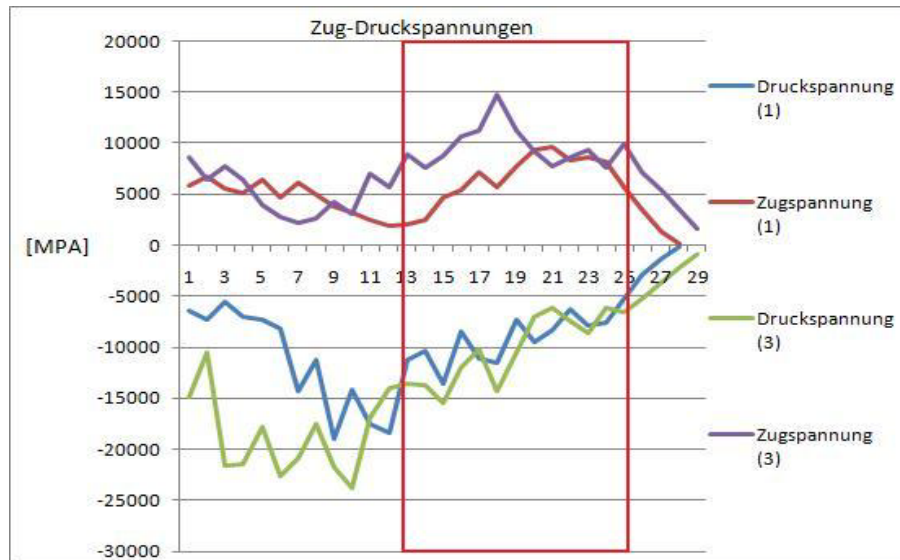


Abbildung 35: Mittlere Zug- und Druckspannungen von Fräser (1) und Fräser (3)

Beim Blick auf die Verformungen (Abbildung 36) hingegen kann für die Maximalverformung eine um den Faktor 2,5 fach größere Verformung des Fräasers (3) gegenüber dem Fräser (1) festgestellt werden. Die dabei aufkommende Frage ist die gerade besprochene Ähnlichkeit der Zug-und Druckspannungen bei einem komplett differenten Verlauf der Verformungskurven. Normalerweise müsste eine größere Verformung auch eine höhere

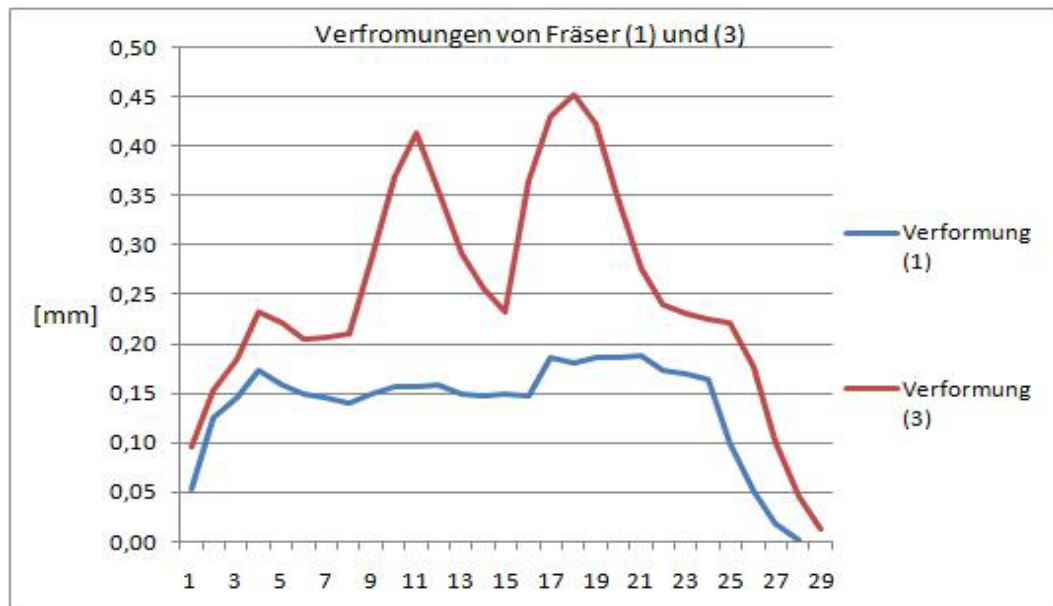


Abbildung 36: Maximale Verformung von Fräser (1) und Fräser (3)

Spannung hervorrufen. Das Phänomen wurde beim ersten Vergleich erläutert. Die Spanne der Verformungsänderung bei (1) liegt im betrachteten Bereich bei ca. 0,035 mm zwischen maximaler und minimaler Verformung, bei (3) hingegen bei 0,22mm. Dies ist die Folge des größeren Gleichförmigkeitsgrades und somit einer größeren Verformung durch die höhere Belastung, wenn 2 Schneiden im Eingriff sind. In Abbildung 37 ist einmal der Übergang von Schneide2 zu Schneide3 gegenübergestellt, um die Präsenz des Mehrfacheingriffs der Kraft und dessen folglich größere Verformung darzustellen. Es ist deutlich zu sehen, dass unter den Schneiden jeweils Zugspannungen infolge Krafteinleitung vor allem in tangentialer Richtung entstehen, die bei Überlastung des Fräasers entweder zum Zahnbruch oder zum Sprödbbruch in der Einspannstelle führen kann. Die Verformung ist dementsprechend zu diesem Zeitpunkt um einiges höher als bei Fräser (1). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Fräser (3) aufgrund der hohen Verformungen und Verformungsänderungen nicht ideal für Zerspanprozesse ist, da diese Verformungsänderungen Schwingungen hervorrufen, welche erhebliche Auswirkungen auf die Bauteilfestigkeit haben könnten. Hingegen muss die Vermutung angestellt werden, dass bei einem Gleichförmigkeitsgrad $n=2$ (unabhängig von der Frage nach der Herstellbarkeit) wieder eine ähnliche Kurve wie bei Fräser (1) zu erwarten ist, allerdings um einen definierten Faktor größer (doppelt so groß) als die des Fräasers (1).

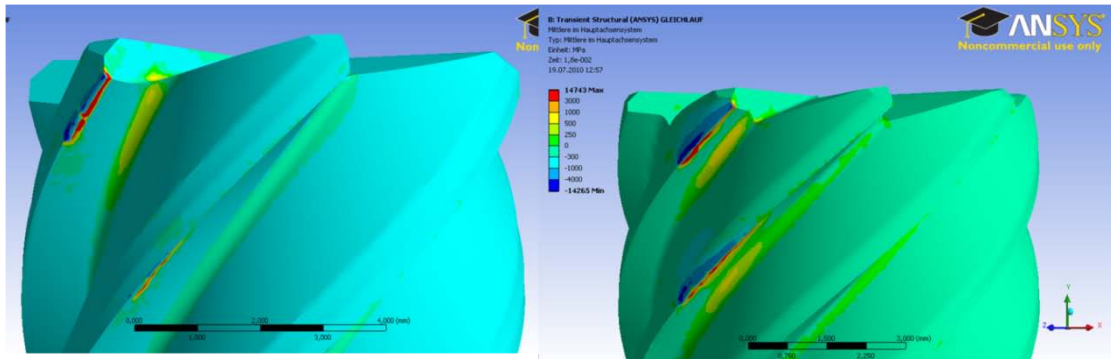


Abbildung 37: Vergleich der verschiedenen Gleichförmigkeitsgrade
Dargestellt sind Fräser (1) und Fräser (3) von links nach rechts.

Im Folgenden werden die Schubspannungen diskutiert, welche in Abbildung 38 zu sehen sind. Hierbei muss erwähnt werden, dass es sich um die Schubspannungen in der XZ-Ebene handelt, daher zwei Kurven je Diagramm. Im Hinblick auf Laständerung am Anfang soll die rote Kurve gesondert betrachtet werden, da diese offensichtlich eine Reaktion auf den Lasteintritt charakterisiert. Auffällig sind hier zum einen die sehr hohen Schubspannungen beim Eintritt bei (3), jedoch rasches Abklingen und dann eine nahezu unverändertes Verhalten bis zum Austritt. Auch bei diesem Schubspannungsvergleich sind die Phänomene aus dem vorherigen Vergleich naheliegend, dass das Abklingen der Schubspannungen mit dem Wechsel der Schubspannungsebenen und damit auch der Schubspannungen zusammen hängt. Die negativen Schubspannungen resultieren aus der Orientierung. Bis auf den hohen Schubspannungswert bei Eintritt des Fräasers (3) sind beide vom Verlauf her ähnlich. Auch die Schubspannung T_{xz} beider Fräser ist ähnlich, der frühere Eintritt des Fräasers (3) hängt mit der höheren Schneidenzahl zusammen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass nach der Untersuchung der Zug- und Druckspannungen, der Verformung sowie der Schubspannungen in XZ-Ebene keine gravierenden Unterschiede festzustellen sind. Am ehesten sind die Verformungen des Fräasers (3) als bedenklich einzustufen, da bei der Feinbearbeitung von Turbinenschaufeln ein hohes Maß an Genauigkeit gefordert ist. Durch eine übermäßige Verformung, auch Abdrängen genannt, ist eine hohe Genauigkeit nicht gewährleistet, daher hat der Sechsschneider Vorteile gegenüber dem Achtschneider. Bei den Schubspannungen ist zu sehen, dass auch hier der Fräser (1) geringe Vorteile aufweisen kann. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass es sich hier nur um einen Vergleich untereinander handelt, somit sind ermittelte Werte nicht zwingend repräsentativ, aber im Vergleich untereinander verwendbar.

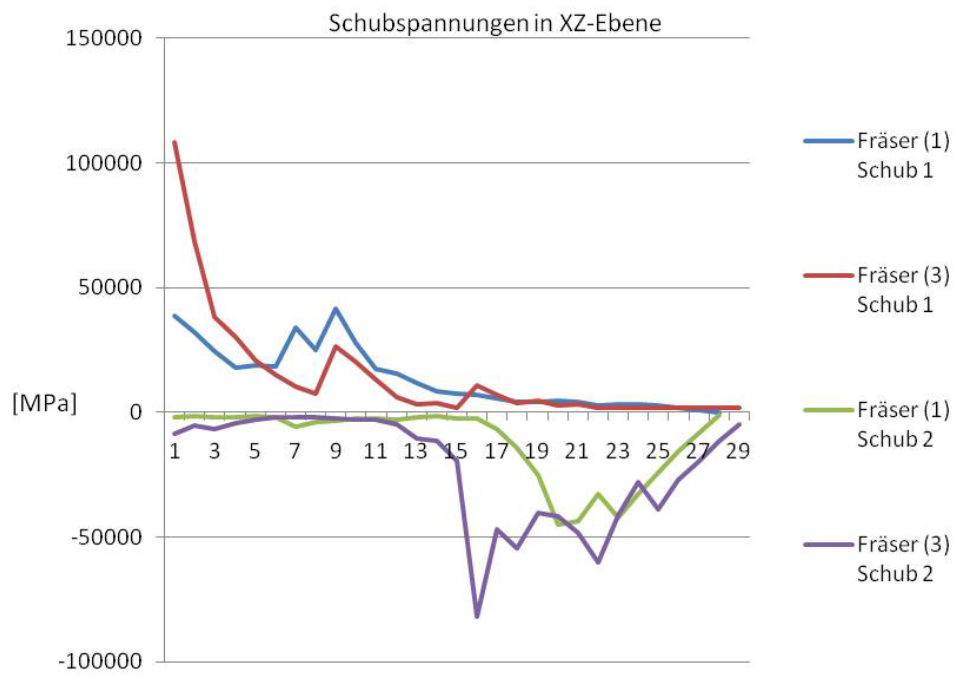


Abbildung 38: Schubspannungen in XZ-Ebene von Fräser(1) und Fräser(3)

8.3 VERGLEICH DES FRÄSERS (2) MIT FRÄSER (3)

Dieser Vergleich soll in erster Linie durchgeführt werden, weil die Geometrien (2) und (3) zwar unterschiedliche Zähnezahlen und Drallwinkel aufweisen, jedoch über nahezu identische Gleichförmigkeit verfügen. Wie in den Vergleichen zuvor soll damit begonnen werden, Zug- und Druckspannungen (Abbildung 39) zu untersuchen. Die Versuche wurden beide für die Betrachtung von 3 Schneiden vorgenommen. Die Zugspannungswerte haben einen ähnlichen Verlauf, hier lassen sich keine gravierenden Unterschiede ausmachen.

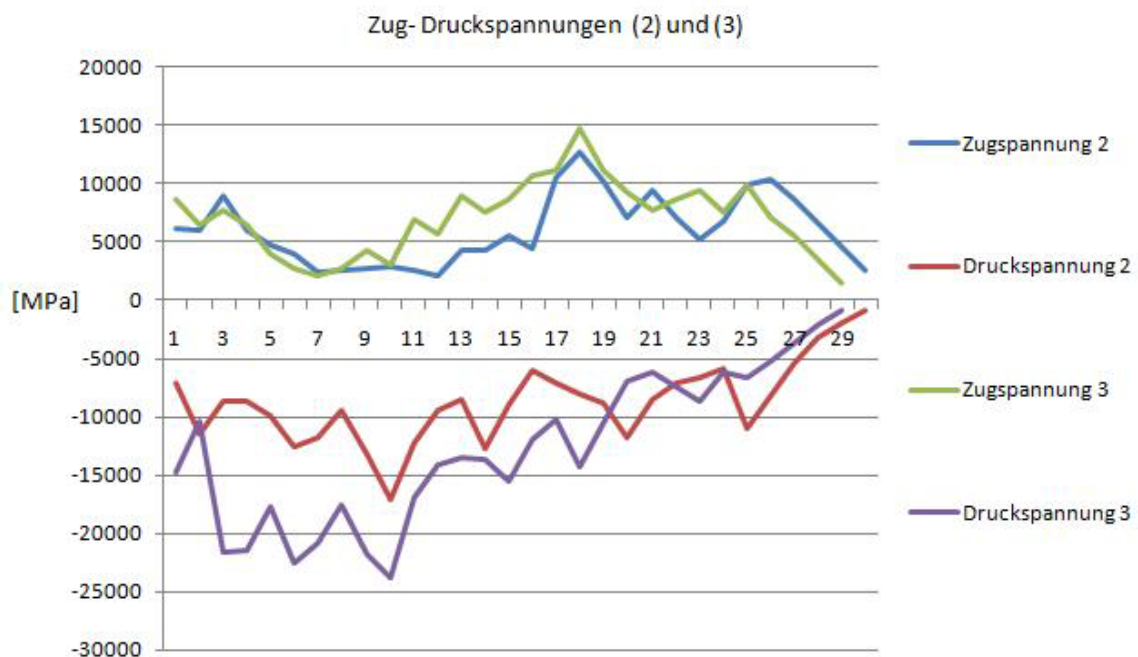


Abbildung 39: Zug-Druckspannungen der Fräser (2) und (3)

Die Druckspannungen weisen allerdings im Eintrittsbereich Unterschiede auf. Dies kann allerdings aus einer ungenauen Aufbringung der Kräfte auf Schneide 1 resultieren. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist gut zu erkennen, dass die Last nicht homogen auf der Schneide aufgetragen ist, sondern Stellen ohne Belastung auftreten. Gründe dafür können beim erstellten Netz als auch beim Anwender liegen. Da allerdings auch hier der kontinuierliche Bereich von Interesse ist, soll diese Druckspannungserhöhung nicht gesondert behandelt werden.

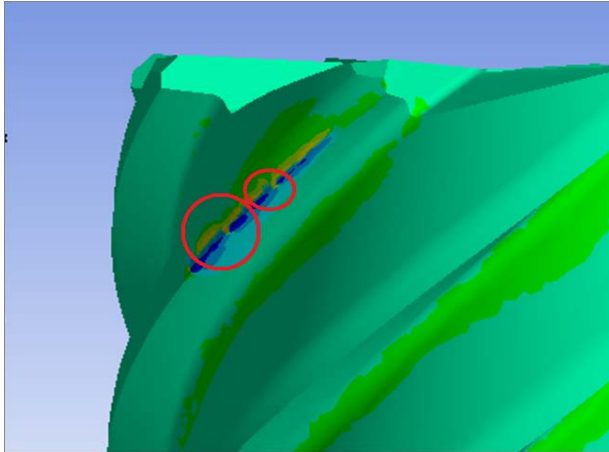


Abbildung 40: Fehlstellen bei der Kraftaufbringung

Fräser (3), Schneide 1, Zeitschritt 6, unstetige Kraftaufbringung

Im kontinuierlichen Bereich haben beide Geometrien sehr ähnliche Verläufe, so dass dieselbe Gleichförmigkeit ein Indiz dafür zu sein scheint, dass auch gleiche (ähnliche) Spannungsverhältnisse auftreten. Dieses Indiz soll durch einen Blick auf die Verformungen (Abbildung 41) kontrolliert werden. Der Verlauf bestätigt die Vermutung. Die beiden Verformungen, resultierend aus der äußeren Last, welche bei beiden gleich ist, zeigt einen nahezu identischen Verlauf, allerdings sind die Verformungswerte der Geometrie (3) um ca. 30% höher. Somit kann eine Proportionalität bei gleicher Gleichförmigkeit und unterschiedlicher Zähnezahl formuliert werden. Bei einer Erhöhung der Zähnezahl um einen Faktor x vergrößert sich auch die Verformung um diesen Faktor x (bei übereinstimmender Gleichförmigkeit).

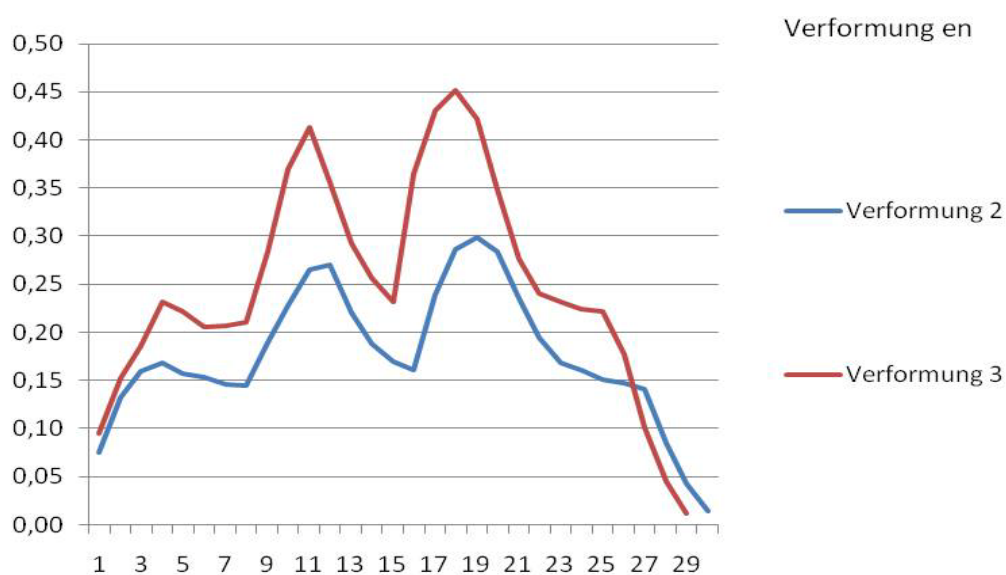


Abbildung 41: Verformungen in [mm] der Fräser (2) und (3)

Der Vollständigkeit halber sollen noch die Schubspannungen verglichen werden. Abbildung 42 zeigt diese für 3 Schneiden. Auch hier ist bis auf den Eintrittsbereich von T_{yx} und den Eintrittsbereich von T_{yz} (bei Zeitschritt 15) ein nahezu gleicher Verlauf zu vermerken. Dies deckt sich mit den ermittelten Werten der Zug-Druckspannungen sowie den Verformungen.

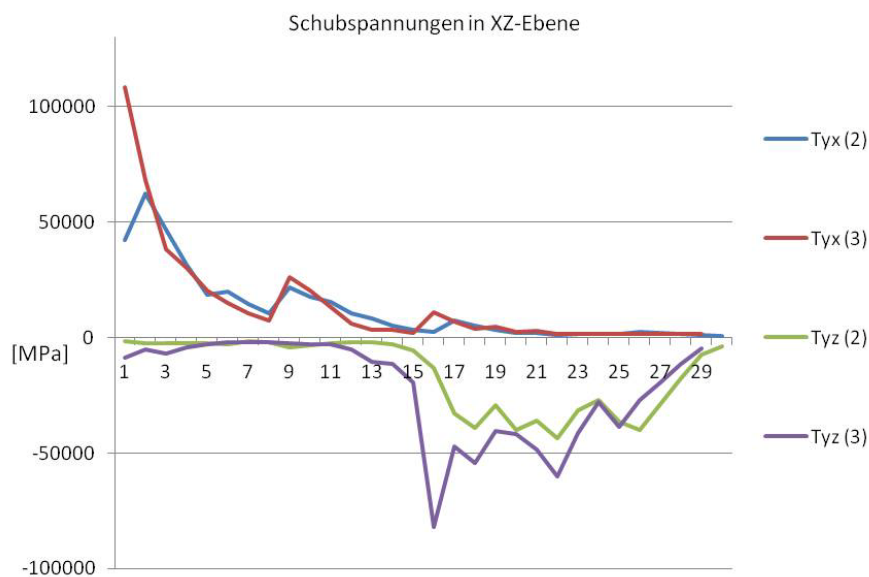


Abbildung 42: Schubspannungen der Fräser (2) und (3)

9 DISKUSSION GEGENLAUFFRÄSEN/GLEICHLAUFFRÄSEN

Im folgenden Abschnitt werden die auftretenden Unterschiede bei der Spannungssimulation beim Gegenlauffräsen und Gleichlauffräsen diskutiert.

Die Diskussion wird anhand der mit Ansys Workbench 12.1 ermittelten Ergebnisse des Fräses z6_d8_48_0.8 (1) geführt.

Je nach Werkzeugdreh- und Vorschubrichtung unterscheidet man zwischen Gleichlauf- und Gegenlauffräsen. Um einen Unterschied zwischen den beiden Varianten zu verdeutlichen, ist in Abbildung 43 jeweils die Bewegung bezogen auf das Werkstück abgebildet. Dabei ist zu bemerken, dass entweder das Werkstück oder das Werkzeug bewegt wird. Deshalb sind in der Abbildung 43 beide Vorschubbewegungen eingezeichnet. Im Versuch wurde dies durch den Vorschub des Werkzeuges realisiert.

Beim **Gegenlauffräsen** ist die Bewegungsrichtung der Schneide des rotierenden Werkzeuges im Eingriffsbereich entgegen der Vorschubrichtung des Werkstückes und bildet vom Eintritt zum Austritt der Schneide während der Zerspanung einen größer werdenden Span aus. Somit sind beim Eintritt der Schneide in das Werkstück anfangs kleinere Kräfte vorhanden, die dann bis zu ihrem Maximum und somit zum bis zum Schneidenaustritt ansteigen. Bei Schneideneintritt zeigen der Schnittgeschwindigkeitsvektor v_c und der Vorschubgeschwindigkeitsvektor v_f in die gleiche Richtung. Der Vorschubrichtungswinkel φ beträgt hier 0° . Ein Nachteil dieser Variante ist der Schneideneintritt, denn zu diesem Zeitpunkt wirkt die Schneide auf das Werkstück eher reibend beziehungsweise quetschend, was sich am Ende in einer schlechteren Oberflächengüte bemerkbar machen kann. Dies ist mit Sicherheit auch vom zu bearbeitenden Werkstoff sowie anderen Faktoren abhängig.

Beim **Gleichlauffräsen** hingegen bewegt sich die Schneide im Eingriffsbereich in Richtung der Vorschubbewegung des Werkstückes und somit ist die Spanausbildung entgegengesetzt zum Gegenlauffräsen. Somit sind beim Eintritt der Schneide in das Werkstück sofort die Maximalkräfte vorhanden, welche aber bis zum Austritt immer kleiner werden. Ein Vorteil gegenüber dem Gegenlauffräsen ist die gleichgerichtete Drehrichtung des Werkzeuges und die Vorschubrichtung des Werkstückes, dadurch wird eventuell auftretendes Rattern [A1] eher unterbunden, was beim Hochgeschwindigkeitsfräsen (High Speed Cutting, HSC) zu unerwünschten Schwingungsphänomenen führen und somit Werkzeugschädigungen nach sich ziehen könnte. Der Vorschubrichtungswinkel φ ist beim Schneidenaustritt 180° , da der Schnittgeschwindig-

keitsvektor v_c und der Vorschubgeschwindigkeitsvektor v_f in unterschiedliche Richtungen zeigen.

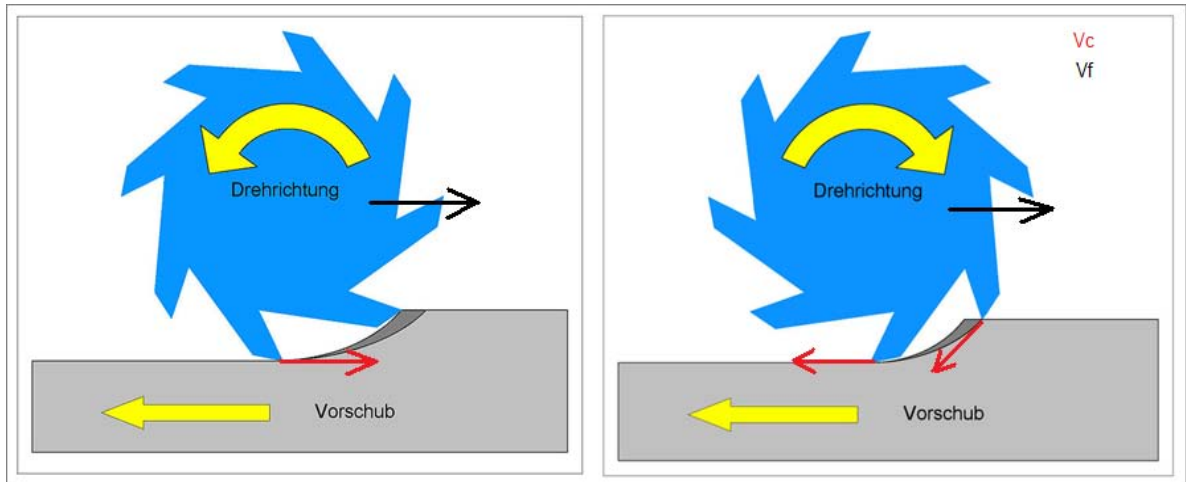


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Rotationsprinzipien von Fräsen

Dargestellt sind Gegenlaufräsen (links) und Gleichlaufräsen (rechts). Abbildung entnommen aus Wikipedia (Schlagwort: Fräsen) und modifiziert

Nachdem die grundlegenden Unterschiede der beiden Bearbeitungsvarianten erklärt wurden, werden nun die Ergebnisse aus der Analyse dargestellt und diskutiert.

Der grundlegende Unterschied bei diesem Vergleich ist die Ausrichtung der Dreieckslast auf der Schneide. Während beim Gleichlaufräsen sofort der Maximalwert aufliegt, kommt beim Gegenlaufräsen der Minimalwert auf die Schneide. Anzumerken ist, dass dies eine rein theoretische Betrachtungsweise ist, bei der lediglich die Lastorientierung geändert wurde. Äußere Einflüsse wie eventuelles Reiben und Rattern beim Gegenlaufräsen ist nicht Teil der Simulation. In Abbildung 44 sind die Verformungen der beiden Fräser gegenübergestellt. Die y-Achse charakterisiert die Verformung [mm] und die x-Achse die Zeitschrittfolge. Fräser (1) zeigt ab dem ersten Zeitschritt eine Verformung, da sofort der Maximalwert der Dreieckslasten (radial, axiale sowie tangentielle Dreieckskomponenten) auf der Schneide auftreten. Infolge der Last auf der Schneide 1 verformt sich der Fräser um einen Betrag von $w_{(1,4)}=0,17242$ mm [Ergebnis aus Analyse-Bericht von Ansys Workbench]. Das erste Indizes bei der Verformung w bezieht sich auf den Fräser, das zweite Indizes auf den Zeitschritt. Durch Wandern der Last Richtung Einspannung verändert sich wieder der Hebelarm und somit verringert sich die Verformung. Fräser (2) hat einen nahezu exponentiellen Anstieg der Verformung, bis zu dem Zeitpunkt, wenn die komplette Last auf der Schneide ist. Dies ist zum Zeitschritt 4 der Fall. Die Verformung beträgt hier $w_{(2,5)}=0,21059$ mm. Somit kommt es zu Anfang zu einer größeren Verformung beim Gegenlaufräsen. Der zweite lokale Maximalwert beim Übergang von Schneide 1 auf Schneide 2 fällt bei beiden geringer aus. Es könnte eine Art Trägheitsreaktion sein, so

dass nach der Erstausslenkung eine Rückausslenkung des Fräasers dem zweiten lokalen Maximum (bei Fräser (1) bei Zeitschritt 12, bei Fräser (2) bei Zeitschritt 13) entgegenwirkt und somit die geringere Verformung bewirkt – dies ist ein Interpretationsansatz. Die maximalen Verformungen erreichen bei beiden Fräsern beim Übergang von Schneide2 auf Schneide3. Hier hat Fräser (1) eine Auslenkung von $w_{(1,17 \text{ und } 21)}=0,18647\text{mm}$ / $0,18762\text{mm}$ und Fräser (2) eine Verformung von $w_{(2,21)}= 0,21409\text{mm}$. Zum einen hat (2) die größere Verformung und zum anderen ist bei einem Blick auf die beiden Kurven zu sehen, dass Spannungsspitzen bei (2) bei der Verformung auftauchen, es kommt als zu höheren Wechselwirkungen der Spannungen auf das Material, bei (1) sind die Verformungen ein wenig niedriger und der Kurvenverlauf verdeutlicht eine ruhigere und weniger sprunghafte Verformungscharakteristik, was der Standzeit entgegen kommt.



Abbildung 44: Verformungsvergleich bei Gleich- und Gegenlaufräsen mit gleicher Fräsergeometrie

Nun sollen die Zug- und Druckspannungen verglichen werden. Diese haben auf den ersten Blick einen ähnlichen Verlauf. Auch hier ist wieder ein unterschiedlicher Anfangsbereich infolge der unterschiedlichen Lasten zu vermerken. Resultierend aus dem Verformungsverhalten kann analog das Spannungsverhalten abgeleitet werden. Im stetigen Bereich (Zeitschritt 14 bis 24) kann man sehen, dass die Druckspannungen bei (1) zwar schwanken, doch im Vergleich zu (2) einen ruhigeren Verlauf haben, mit ruhig sind die Druckspannungsschwankungen gemeint.

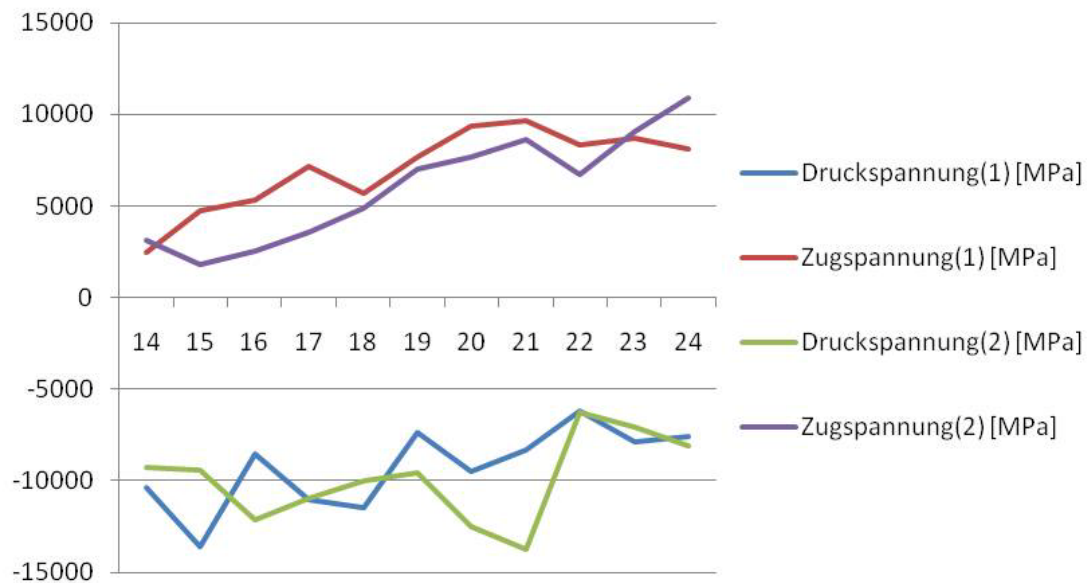


Abbildung 45: Zug- und Druckspannungen bei Gleich- und Gegenlaufräsen

Dargestellt ist der Zeitintervall [Zeitschritt 14 bis 24] bei Gleich- (1) und Gegenlauf (2).

Nachdem die auftretenden Zug/Druckspannungen verglichen wurden, soll nun gezielt an der Fräsergeometrie beobachtet werden, wie sich die Spannungen wo ausbilden, denn bis jetzt wurde lediglich über die Werte der Spannungen gesprochen, aber nicht über den Ort. Ein Blick auf den Übergang von Schneide2 auf Schneide3 soll den Sachverhalt verdeutlichen. Eine erste kritische Stelle ist die markierte Stelle a, da diese neben der

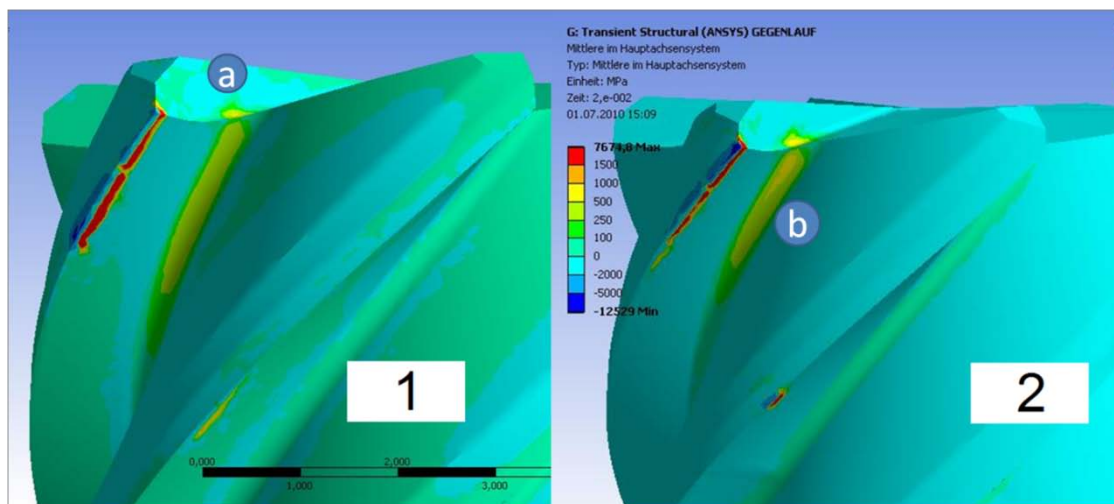


Abbildung 46: Orte hoher Spannungen von Gleich- (1) und Gegenlaufräsen (2)

Hauptschneide die Stelle der höchsten Belastungen darstellt. Die Stelle b (Abbildung 46) zeigt den Schneidengrund. Durch die Hebelwirkung der Nuttiefe wird dieser Bereich im Zerspanprozess stark beansprucht. Auch hier können keine gravierenden Unterschiede ausgemacht werden. Wie bereits vermutet, kann eine einfache Spannungssimulation die Unterschiede zwischen Gleich- und Gegenlaufräsen nicht aufzeigen. Effekte wie das

Rattern oder das Reiben beim Gegenlaufräsen können mit dieser Art nicht simuliert und in die Betrachtung einbezogen werden. Dennoch hat sich beim Forschungsprojekt *TechVolk* das Gleichlaufräsen durchgesetzt, da es bessere Oberflächengüten erzeugt und kleinere Kräfte, die auf das Werkzeug wirken, entstehen.

10 ABLEITUNG VON GESTALTUNGSEMPFEHLUNGEN

Nun sollen aus den gewonnenen Ergebnissen Gestaltempfehlungen abgeleitet werden.

Vorher kann zusammengefasst werden, dass bei gleicher Zähnezahl und unterschiedlichem Drallwinkel auch die Ergebnisse differieren, die Geometrie (1) hat Vorteile. Auch bei gleichem Drallwinkel und unterschiedlicher Zähnezahl unterscheiden sich die Ergebnisse. Auch hier kann Geometrie (1) die günstigeren Spannungswerte ausweisen. Hingegen wurden bei gleichem Gleichförmigkeitsgrad und unterschiedlicher Zähnezahl gleiche bzw. ähnliche Ergebnisse ermittelt. Anhand der Ergebnisse aus den Vergleichen kann dennoch geschlussfolgert werden, dass Fräser (1) Vorteile in Hinblick auf niedrigere Spannungswerte und geringere Verformung aufweist. Die ermittelten Werte von Geometrie (2) und (3) zeigen ungünstigere Werte als Geometrie (1). Tabelle 9 vergleicht die drei Geometrien miteinander.

Tabelle 9: Bewertung der Vergleichskriterien

Vergleichskriterium	(1)	(2)	(3)
Zug-Druckspannung	+	-	-
Verformung	+	-	-
Schubspannung	+	-	-
<i>Gleichförmigkeitsgrad</i>	<i>1,06</i>	<i>1,53</i>	<i>1,52</i>

Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass der Gleichförmigkeitsgrad direkt Aussage über die Standzeit geben kann. Somit sollte eine Gleichförmigkeit nahe 1 angestrebt werden.

Daraus ergeben sich folgende Gestaltungsempfehlung: Es sollte beim Herstellen der Geometrien darauf geachtet werden, geometrische Parameter wie Drallwinkel und Zähnezahl so zu wählen, dass sich ein Gleichförmigkeitsgrad nahe 1 ergibt.

Rein theoretisch betrachtet grenzt das die Geometrieauswahl stark ein, denn für 8 Zähne müsste dann ein Drallwinkel von 37° bis 45° eingestellt werden. Bei niedrigerer Zähnezahl (4) hingegen würde ein größerer Drallwinkel (55° bis 59°) das Resultat sein.

11 ABLEITUNG VON EMPFEHLUNGEN FÜR DEN DETAILIERUNGSGRAD DER SIMULATION

Nun soll die Simulation auf deren Genauigkeit und den Grad der Detaillierung untersucht werden. Dazu wird nochmals ein Blick auf die Abfolge der Schritte bei der Ausführung der Simulation geworfen, um die Schwerpunkte *CAD-Modell*, *Vernetzung* und *Kraftaufbringung* zu evaluieren.

11.1 CAD-MODELL UND IMPORTIEREN

Das in SolidWorks2007 erstellte CAD-Modell hat eine sehr gute Beschaffenheit nach dem Importieren in die Ansys Workbench12.1. Das heißt, der Volumenkörper, die Flächenelemente sind sauber und fehlerfrei und erlauben es dem Anwender, sofort mit der Analyse zu starten, ohne sich lange mit Reparaturschritten auseinander setzen zu müssen. Wichtig ist nach dem Importieren, bei den Geometrieigenschaften (Basic Geometry Options) *Solid Bodies* sowie *Surface Bodies* auszuwählen. Des Weiteren ein Kommentar zum Kontaktbereich. Während der Spannungssimulation ist es ab und an zu Problemen mit dem Kontaktbereich gekommen. Deshalb sollten bei externer Modellierung

```
** ERROR **                CP
= 574.480 TIME= 18:46:49
*** MESSAGE CONTINUATION ----
DIAGNOSTIC INFORMATION ***
If one or more parts of the model are held
together only by contact
verify that the contact surfaces are
closed. You can check contact
status in the SOLUTION module for the
converged solutions using
CNCHECK.

*** ERROR **                CP
= 4574.480 TIME= 18:46:49
*** MESSAGE CONTINUATION ----
DIAGNOSTIC INFORMATION ***
Rigid body motion can also occur when net
section yielding has
occurred resulting in large displacements for
small increments of load
or when buckling has occurred. You can
plot the time history curve
for node 52665 in the UX direction to check
for stiffness (slope of
the curve) approaching
zero.
```

Abbildung 47: Ausschnitt Fehlermeldung (Ansys) aufgrund von Kontaktproblemen

so wenig wie möglich Kontaktbereiche zur Anwendung kommen. Im beschriebenen Fall kam es zu folgender Fehlermeldung (Abbildung 47). Diese oder ähnliche Fehlermeldungen traten unregelmäßig auf. Es handelt sich um Starrkörperbewegungen, also Bewegungen in der Kontaktzone, welche aus der Nachgiebigkeit der Vernetzungsbereiche resultiert oder durch Stauchungen oder Knickungen verursacht wird. Um diesen Fehler zu beheben, wurden die Kontaktsteifigkeit sowie der *Pinballradius* verändert. Der *Pinballradius* definiert den Bereich, in dem nach Dreiecksflächen oder Tetraedern gesucht wird. Je größer der Radius, umso größer die Wahrscheinlichkeit, eine Dreiecksfläche oder ein Tetraeder zu finden, die Erhöhung wird vor allem in unregelmäßigen Netzen verwendet. In

Bereichen mit regelmäßiger Netzstruktur reicht hingegen ein kleiner Radius mit den Abmaßen der benachbarten Knoten untereinander aus. Mit größer werdendem Radius steigt allerdings die Rechenzeit. Die Kontaktsteifigkeit wurde um einen bestimmten Betrag verringert. Dieser Prozess ist schwierig, es wird so lange verändert und angepasst, bis der Solver die komplette Rechnung durchrechnen kann.

11.2 VERNETZUNG

Die Qualität der Vernetzung ist nicht einfach zu beurteilen. Vernetzt wurde *manuell* mit den Elementtypen Solid186 und Solid187 vernetzt. Dies sind dreidimensionale Elemente mit Mittelknoten. Ansys wählte diese Methode automatisch und während der Anwendung kam es zu keinen Komplikationen. Der Versuch, ein strukturiertes Netz auf die Schneiden zu bringen, scheiterte aufgrund der komplexen Schneidengeometrie. Mit Verfeinerungszyklen (1-fach) konnte das bestehende Netz auf den Schneiden allerdings gut vernetzt werden. Nur der Übergang von der Zylinderfläche auf den verjüngten Schneidenbereich hätte besser gewählt werden können. In diesem Bereich wurde von einer Elementgröße von 1 mm auf 0,2mm verkleinert, dies führt in diesem Bereich mit Sicherheit zu ungenauen Ergebnissen. Hier hätte das Netz abgestufter verringert werden sollen. Da der beschriebene Bereich allerdings keine kritische Stelle hinsichtlich auftretender Spannungen darstellt, wurde auf eine Anpassung verzichtet.

11.3 KRAFTAUFBRINGUNG

Die Simulation der Last wurde in dieser Arbeit durch direktes Aufbringen auf die Schneide realisiert, dabei wurden zuerst die Knoten auf den Schneiden durch Komponentenerstellung ermittelt und dann mit Hilfe eines INPUT-Files auf die Geometrie übertragen. Somit kann in mehreren Zeitschritten eine Rotation des Fräasers simuliert werden, ohne dass sich dieser in der Anwendung dreht. Diese Variante wurde gewählt, da mit ihr eine gute Steuerbarkeit der Kräfte gewährleistet ist, da axiale, tangential und radiale Kräfte an der Schneide wirken sollen. Der Nachteil dieser Art der Implementierung liegt im relativ hohen Aufwand. Gerade im Hinblick darauf, anstatt drei Schneiden einmal alle Schneiden während einer kompletten Umdrehung im Eingriff zu beobachten, ist für zukünftige Arbeiten anzustreben.

12 AUSBLICK

Nachdem die Geometrien miteinander verglichen wurden, soll in diesem Gliederungspunkt ein Ausblick darüber gegeben werden, welche Änderungen vorgenommen werden könnten, um eine Verbesserung der Spannungsverhältnisse zu erzielen. Die folgenden Anregungen sind rein theoretischer Natur, welche in der Praxis durch Versuche untersucht werden müssten.

12.1 SCHNEIDENBEREICH

Die Umfangsschneide in Abbildung 48(a) ist der Ort mit der maximalen Belastung während des Eingriffes. Somit werden hohe Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit und Bruchzähigkeit an das Material gestellt. Da spröde Werkstoffe wie SiAlON kein oder nur wenig Fließverhalten hat, muss durch die Ausführung der Geometrie sichergestellt werden, diese Eigenschaften zu kompensieren. Eine Möglichkeit, um die Spannungen zu reduzieren, wäre das Ändern des Einstellwinkels für die Nut. Dieser beträgt standardisiert 5°, rot markiert in Abbildung 49 zu sehen. Wenn man diesen Winkel vergrößern würde, kann die Schneide mehr Stabilität aufgrund eines stumpferen Winkels gegenüber der Voreinstellung haben. Allerdings müsste eine Untersuchung der Spannbildung sowie Spanabtransportierung folgen, da sich geometrische Beziehungen ändern würden.

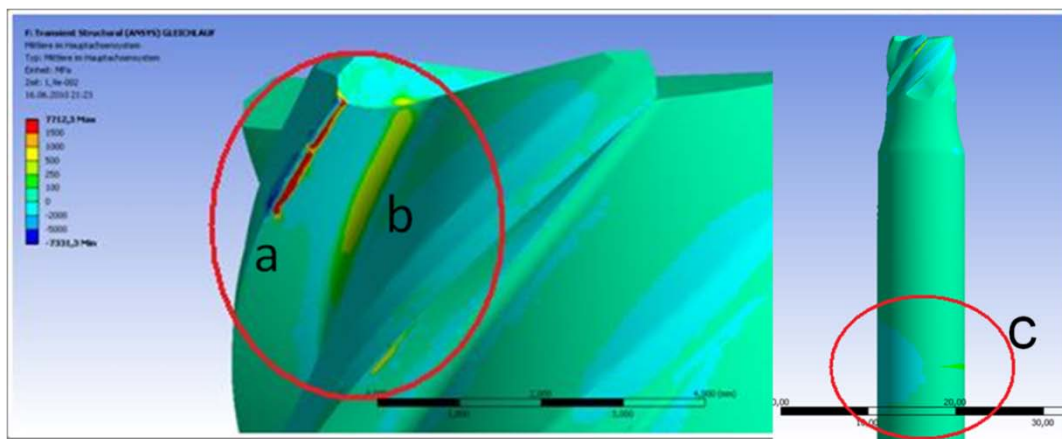


Abbildung 48: Hochbeanspruchte Bereiche während des Fräsens von Fräser (1)

12.2 NUTGRUND

Auch der Nutgrund, zu sehen in Abbildung 48 b stellt eine kritische Stelle dar. Die hohen Zugspannungen entstehen durch die Hebelwirkung des Zahnes auf den Grund der Nut. Allerdings sind die Spannungen um ein Vielfaches kleiner, als die lokalen Zugspannungen an der Schneide. Da die Nuttiefe eingehalten werden muss, kann geometrisch nicht viel

verändert werden. Einen Ansatz soll dennoch versucht werden. In Abbildung 49 ist der Radius für den Grund der Nut mit $R = 0,2 \text{ mm}$ angegeben. Die Überlegung geht dahin, den Radius zu vergrößern, um sich von einer eventuellen Kerbwirkung zu entfernen. Hier von Kerbwirkung zu sprechen, ist nicht ganz korrekt, vielmehr soll eine kraftflussgerechte Gestaltung [K2] das Bauteil vor Schädigungen schützen. Dabei ist die Annahme, dass die Zugspannungen verringert werden könnten, wenn der Übergangsbereich mit dem Radius vergrößert werden würde. Allerdings muss auch hier angebracht werden, dass mit vergrößertem Radius das Volumen, was für die Spanabfuhr zuständig ist, kleiner wird. Somit könnte das Werkzeug danach stärker dazu neigen, Materialverschmierungen anzusammeln oder einfach das Zusetzen von abgetragenen Material im Spannutraum zu begünstigen. Die praktischen Versuche unterstreichen die Ergebnisse der Analyse. Wenn ein Fräser nach einer gewissen Zeit gebrochen ist, dann ist dies entweder direkt an der Schneide passiert, oder die gesamte Schneide ist ausgebrochen, oder bei Überbelastung der Schnittkräfte ist der Fräser an der Einspannstelle (Abbildung 49, Stelle c) infolge zu großer Verformung gebrochen.

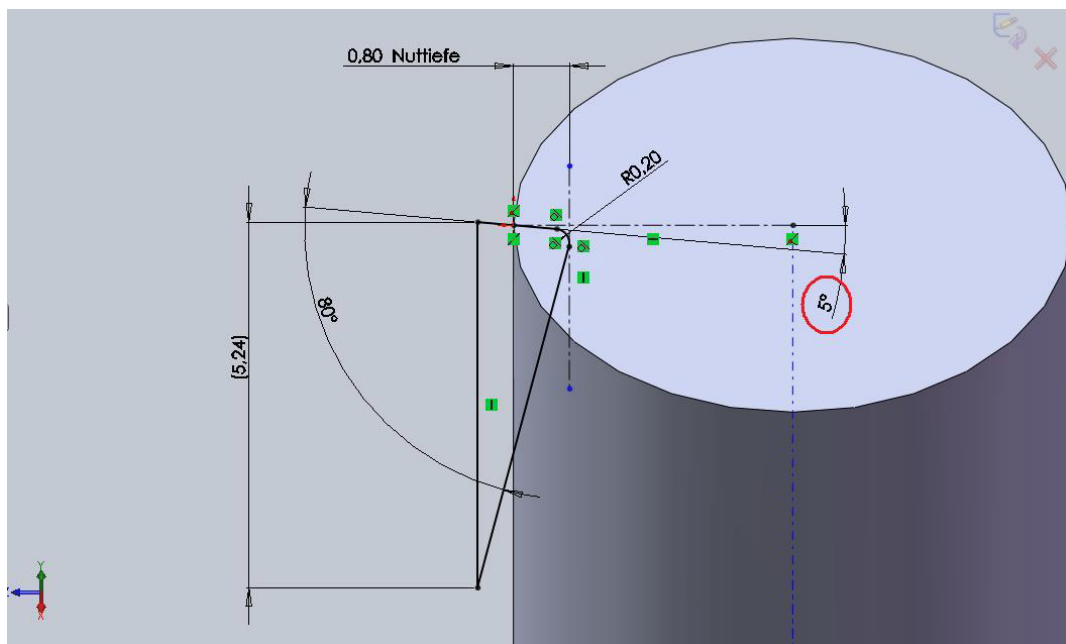


Abbildung 49: Darstellung der Skizze für die Nuterzeugung (SolidWorks)

12.3 ALLGEMEINES

Es wurden lediglich Berechnungen für die Gleichförmigkeitsgrade 1, 1.53 und 1.52 durchgeführt. Da keine Ergebnisse für andere Gleichförmigkeitsgrade vorliegen, sollten für mehrere verschiedene Grade Analysen durchgeführt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [A1] Awiszus/Bast/Dürr/Mathes , Grundlagen der Fertigungstechnik, 2. Auflage, Abschnitt 4.3.2.1
- [B1] Betriebsanleitung KISTLER, Seite 19
- [F1] Fritz, Schulze, Fertigungstechnik, 8.Auflage, 2008, Abschnitt 4.6.3
- [G1] Gebhardt, Konstruktionsbegleitende Berechnung mit Ansys Design Space, 2009
- [G2] Grote, Feldhusen,Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 22.Auflage
- [H1] Szabo, Istvan Einführung in die Technische Mechanik, Kapitel: Die Statik der starren Körper, §3 Über die Kraft, Seite 29, 8. Auflage 1975H
- [H2] Hornbogen, Werkstoffe 2002,Seite 245
- [K1] Klocke, Fertigungsverfahren,8.Auflage 2008,Abschnitt 7.4, 7.5, 7.6, 7.7
- [K2] Kurz,Hintzen,Laufenberg, Konstruieren Gestalten Entwerfen,4. Auflage, 2009, Seite 72
- [M1] Metalltechnik,Zerspantechnik Fachbildung, 4. Auflage,2008
- [U1] Uhlmann, Wacinski, 2010, Vollkeramische Fräswerkzeuge prozesssicher einsetzen (pdf)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung der Eingriffsparameter des Zerspanprozesses	6
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Schneide	7
Abbildung 3: Ablauf bei der Modellierung eines CAD-Modelles.....	8
Abbildung 4: Darstellung der Freistiche eines CAD-Modelles	10
Abbildung 5: Darstellung der Freiwinkel und der Kantenbrüche eines CAD-Modelles	10
Abbildung 6: Arbeitsschrittfolge zur Erzeugung der Fräsergeometrie.....	11
Abbildung 7: Überblick des Versuchsstandes	12
Abbildung 8: Aufbau des Versuchsstandes.....	13
Abbildung 9: Kraftsignale aus der Messung	15
Abbildung 10: Signaldarstellung der einzelnen Kraftkomponenten.....	15
Abbildung 11: Benutzeroberfläche der Ansys Workbench.....	17
Abbildung 12: Einspannung des Fräasers (Fixierte Lagerung).....	19
Abbildung 13: Vernetzungsbereiche der Fräsergeometrie	21
Abbildung 14: Darstellung der resultierenden Dreieckslast und deren Bewegungsrichtung.....	22
Abbildung 15: Skizze zur Verdeutlichung des Einflusses von a_e auf l_{dach}	23
Abbildung 16: Komponentenerstellung (links) und Eingabedatei mit den Knotennummern einer ausgewählten Komponente	24
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Dreieckslast.....	25
Abbildung 18: Ausschnitt aus der Übersicht der Lastenverteilung auf den Schneiden 1 und 2, dargestellt ist nur ein kleiner Bereich beim Lastübergang der Schneiden.....	36
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Spannbildung infolge Gleichlaufräsen	37
Abbildung 20: Einspannungsbereich bei der Modalanalyse	40
Abbildung 21: Darstellung Eigenfrequenzen	41
Abbildung 22: Darstellung der 1. Eigenform.....	42
Abbildung 23: Darstellung der 2. Eigenform.....	42
Abbildung 24: Darstellung der 3. Eigenform.....	43
Abbildung 25: Darstellung der 4. Eigenform.....	43
Abbildung 26: Darstellung der 5. Eigenform.....	44
Abbildung 27: Darstellung der 6. Eigenform.....	44
Abbildung 28: vereinfachtes Modell für Eigenfrequenzberechnung	45
Abbildung 29: Zug- und Druckspannungen von Fräser (1) und Fräser (2).....	51
Abbildung 30: Zug- und Druckspannungswechsel auf der Schneide von Fräser (1)	52
Abbildung 31: Vergleich der Verformungen von Fräser (1) und Fräser (2)	52
Abbildung 32: Verdeutlichungsskizze der rechnerischen Ermittlung der Verformung.....	53
Abbildung 33: Schubspannung in XZ-Ebene.....	54

Abbildung 34: Darstellung Schubspannungen	55
Abbildung 35: Mittlere Zug- und Druckspannungen von Fräser (1) und Fräser (3)	58
Abbildung 36: Maximale Verformung von Fräser (1) und Fräser (3).....	59
Abbildung 37: Vergleich der verschiedenen Gleichförmigkeitsgrade	60
Abbildung 38: Schubspannungen in XZ-Ebene von Fräser(1) und Fräser(3)	61
Abbildung 39: Zug-Druckspannungen der Fräser (2) und (3)	62
Abbildung 40: Fehlstellen bei der Kraftaufbringung.....	63
Abbildung 41: Verformungen in [mm] der Fräser (2) und (3)	64
Abbildung 42: Schubspannungen der Fräser (2) und (3).....	64
Abbildung 43: Gegenüberstellung der Rotationsprinzipien von Fräsen	66
Abbildung 44: Verformungsvergleich bei Gleich- und Gegenlaufräsen mit gleicher Fräsergeometrie.....	67
Abbildung 45: Zug- und Druckspannungen bei Gleich- und Gegenlaufräsen	68
Abbildung 46: Orte hoher Spannungen von Gleich- (1) und Gegenlaufräsen (2).....	68
Abbildung 47: Ausschnitt Fehlermeldung (Ansys) aufgrund von Kontaktproblemen.....	71
Abbildung 48: Hochbeanspruchte Bereiche während des Fräsens von Fräser (1)	73
Abbildung 49: Darstellung der Skizze für die Nuterzeugung (SolidWorks)	74

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Auflistung der Fräsergeometrieparamter	5
Tabelle 2: Materialdaten und Kennwerte des SiAlON.....	17
Tabelle 3: Einzelkräfte der radialen Kraftkomponenten mit Variablenzuweisung.....	26
Tabelle 4: Einzelkräfte der tangentialen Kraftkomponenten mit Variablenzuweisung	28
Tabelle 5 Einzelkräfte der axialen Kraftkomponenten mit Variablenzuweisung	29
Tabelle 6: Auflistung der verwendeten Zeitschritte.....	35
Tabelle 7: Anstiegswerte im Intervall $[0^\circ \dots 18^\circ]$	38
Tabelle 8: Parameter, welche für die Modalanalyse verwendet wurden	39
Tabelle 9: Bewertung der Vergleichskriterien.....	70

Werkstoffdatenblatt für heißgepresstes Siliziumnitrid/Titannitrid

1. Material				
FCT Bezeichnung		HPSN-TiN80/20		
Werkstoffbezeichnung		heißgepresstes Siliziumnitrid/Titannitrid-80/20		
2. Microstructure				
Rohdichte	ρ	[1]	[g/cm³]	3,60
Offene Porosität			[%]	0
Korngröße			[µm]	1-10
3. Mechanische Eigenschaften				
Härte		[2]	[HV1]	1.775
Druckfestigkeit			[MPa]	3.000
Biegefestigkeit	s	[3]	[MPa]	900
Weibull-Modul			m	15
Bruchzähigkeit	K _{IC}		[MPam ^{1/2}]	7
Elastizitätsmodul	E		[GPa]	340
Poissonzahl	ν			0,25
4. Thermische Eigenschaften				
Max. Einsatztemperatur				
- inerte Atmosphäre			[°C]	1.200
- Luft			[°C]	1.200
spezifische Wärmekapazität			J/kgK	720
Wärmeleitfähigkeit λ (20°C)			[W/mK]	25
Wärmeausdehnungskoeff. α	RT-1000°C		[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,0
	RT- 250°C		[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	2,2
Thermoschockparameter R ₁	[4]		[K]	496
Thermoschockparameter R ₂	[5]		[W/m]	12.408
5. Chemische Zusammensetzung				
- Si ₃ N ₄			[%]	72
- TiN			[%]	20
- Al ₂ O ₃			[%]	5
- Y ₂ O ₃			[%]	3

[1] Bestimmung der Dichte und Porosität entsprechend DIN 51918 (Archimedes' principle)

[2] Härte gemäß ENV 843-4

[3] Durchschnittswert der 4-Punkt-Biegeprüfung bei Raumtemperatur gemäß EN 843

[4] Kritische Temperaturdifferenz bei schnellem Temperaturwechsel (Abschrecken)

$$R_1 = \frac{\sigma(1-\nu)}{E\alpha}$$

[5] Temperaturschockkoeffizient bei konstanter Temperaturerhöhung (Aufheizen)

$$R_2 = \frac{\sigma(1-\nu)}{E\alpha} \lambda$$

Werkstoffkennwerte sind an Prüfkörpern ermittelt. Sie sind nicht ohne weiteres auf Bauteile übertragbar

DANKSAGUNG

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn von der Hochschule Mittweida für die Betreuung des Themas, die hilfreichen Anregungen und die problemlose Kommunikation bedanken.

Ein besonderes Dankeschön gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Manuel Wacinski vom Fraunhofer IPK aus Berlin. Bei Ihm möchte ich mich für die Bereitstellung des interessanten Themas, die stetige Diskussionsbereitschaft und für das entgegengebrachte Vertrauen sowie das entspannte Miteinander und die kompetente Unterstützung während des gesamten Zeitraumes bedanken.

Weiterhin möchte ich mich für das angenehme Arbeitsklima sowie anregende Diskussionen bei Dr. Bart von Dykeren und Jens Bongards bedanken. Auch Marcel Oertel danke ich sehr für sein Engagement.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, die mir das nötige Vertrauen entgegengebracht hat und durch Ihre Unterstützung den Grundstein für ein erfolgreiches Abschneiden gelegt hat.

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit wurden von mir selbst erstellt oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Berlin, den 23. August 2010